

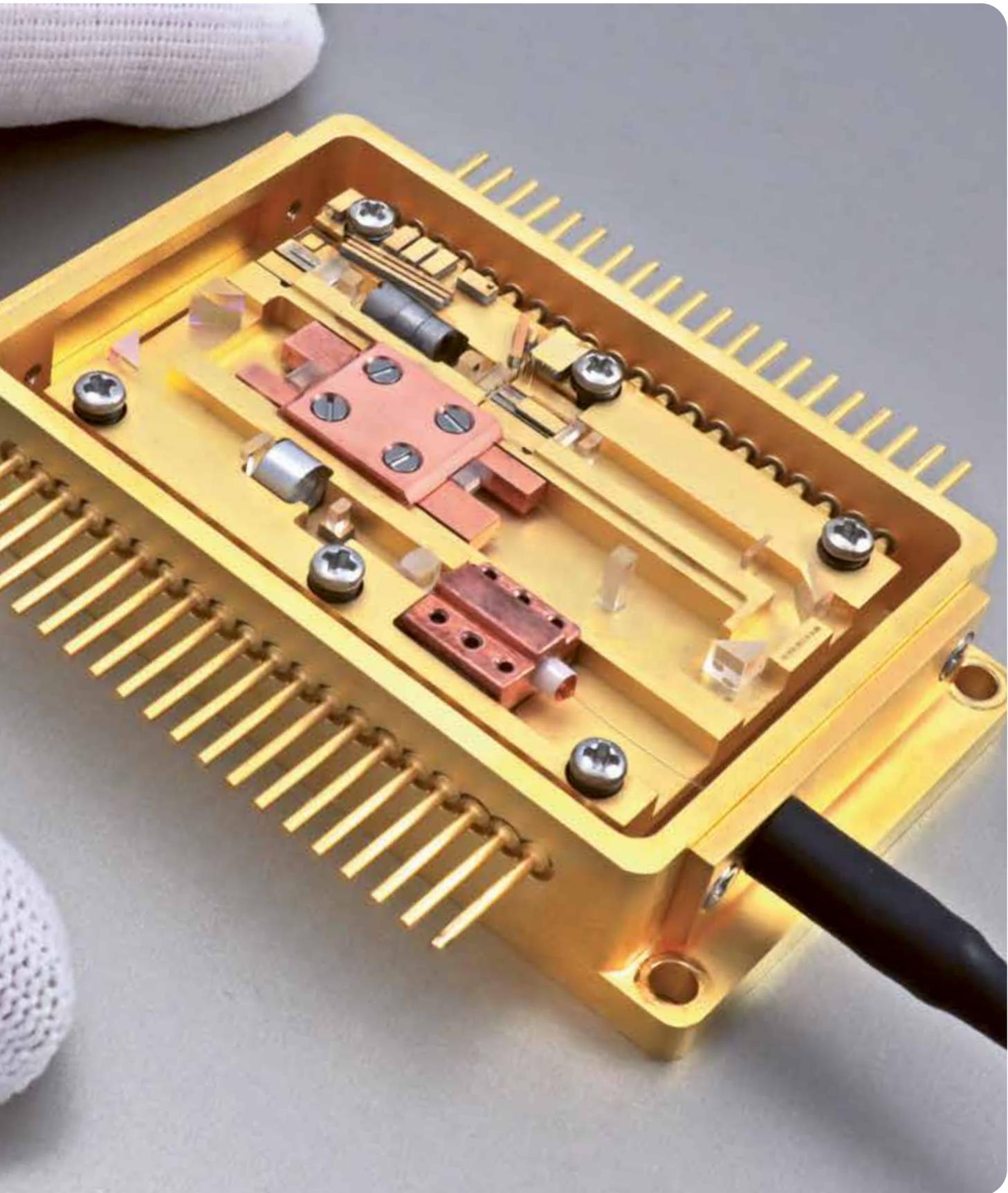
# ANNUAL REPORT JAHRES BERICHT



2023  
2024

⬇ Fiber-coupled laser module for ophthalmology  
and high-resolution microscopy.

Fasergekoppeltes Lasermodul für die Augenheilkunde  
und hochauflösende Mikroskopie.



# Editorial

## Vorwort



### **Nothing is as constant as change ...**

Günther Tränkle took over as director of the Ferdinand-Braun-Institut with its roughly 100 employees in the post-reunification period. After almost 30 years, he handed over a well-established, internationally recognized institute with more than 380 colleagues at the turn of the year. As new management team, we have started the year 2024 aiming to continue this success story. The motto of the official ceremony marking this succession is both motto and challenge for us: **technologically leading . visionary . successful!**

A generational change is also underway in several labs and departments, which we are advancing through three joint appointment processes with our university partners. Additionally, we are bridging the gap to practical application through close collaboration with our industrial partners.

### **Nichts ist so beständig wie der Wandel ...**

In der Nachwendezeit übernahm Günther Tränkle die Leitung des Ferdinand-Braun-Instituts mit gut 100 Mitarbeitenden. Nach beinahe 30 Jahren übergab er zum Jahreswechsel ein gut aufgestelltes, international anerkanntes Institut mit mehr als 380 Kolleginnen und Kollegen. Als neues Führungsteam sind wir ins Jahr 2024 gestartet, um diese Erfolgsgeschichte fortzuschreiben. Das Motto der Veranstaltung zur feierlichen Staffelübergabe ist für uns Leitspruch und Herausforderung zugleich: **technologisch führend . visionär . erfolgreich!**

Ein Generationenwechsel steht auch in einigen Labs und Departments an, den wir im Rahmen von drei gemeinsamen Berufungen mit universitären Partnern vorantreiben. Die Brücke in die Anwendung schlagen wir durch die enge Zusammenarbeit mit unseren industriellen Partnern.

The last years have shown how important it is to reduce dependency on international supply chains. After all, every technology product today relies on microchips, which highlights the necessity of endeavors like the European Chips Act. The initiative aims to boost Europe's share of global chip production to approximately 20 percent by 2030. With its application-oriented research, FBH is an integral part of the European consortium as part of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) activities. In particular, we are contributing our expertise in indium phosphide-based heterointegration and gallium arsenide-based diode lasers to set up the pilot line for "Advanced Heterogeneous System Integration and Advanced Packaging". This production line aims to provide companies and research institutions with an unprecedented range of innovative device technologies and materials in and from Europe.

Our further research activities in photonics, electronics, and quantum technologies cover a broad spectrum along the entire value chain: from chip development and manufacturing to modules and the assembly of prototypes. We are also committed to securing skilled workers: from industrial-technical training to the qualification of young academics.

We thank our dedicated employees, whose expertise and commitment ensure excellent results. Our thanks also go to our long-standing customers and partners. We look forward to further exciting projects with you. Last but not least, we would like to thank our funding bodies, the State of Berlin and the Federal Government, for their essential support that makes our research possible.

In this annual report, you'll discover the results of our diverse activities. We hope you find it a stimulating read

Patrick Scheele & Karin-Irene Eiermann

Die letzten Jahre haben gezeigt, wie wichtig es ist, unabhängiger von internationalen Lieferketten zu werden. Denn in jedem Technologieprodukt stecken heutzutage Mikrochips. Daher wurde der European Chips Act initiiert, mit dem ehrgeizigen Ziel, den Anteil der europäischen Chipproduktion am Weltmarkt bis 2030 auf circa 20 Prozent zu erhöhen. Mit seiner anwendungsorientierten Forschung ist das FBH im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) Teil des europäischen Konsortiums. Wir bringen unser Know-how bei der Indiumphosphid-basierten Heterointegration und bei Galliumarsenid-basierten Diodenlasern in den Aufbau der Pilotlinie für „Advanced Heterogeneous System Integration and Advanced Packaging“ ein. Sie soll Unternehmen und Forschungseinrichtungen eine nie dagewesene Bandbreite an innovativen Bauteil-Technologien und Materialien in und aus Europa bieten.

Unsere weiteren Forschungsaktivitäten in Photonik, Elektronik und den Quantentechnologien decken ein breites Spektrum entlang der kompletten Wertschöpfungskette ab: von der Chipentwicklung und -fertigung über Module bis hin zum Bau von Prototypen. Darüber hinaus engagieren wir uns in der Fachkräfteförderung: von der klassischen gewerblichen Ausbildung bis hin zur Qualifizierung des akademischen Nachwuchses.

Wir danken unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die mit ihrem Know-how und ihrem Engagement für exzellente Ergebnisse sorgen. Unser Dank gilt auch den langjährigen Kunden und Partnern. Wir freuen uns auf weitere spannende Projekte mit Ihnen. Nicht zuletzt danken wir unseren Zuwendungsgeber des Landes Berlin und des Bundes, die unsere Forschung ermöglichen und fördern.

Die Ergebnisse unserer vielfältigen Aktivitäten können Sie in diesem Jahresbericht nachlesen. Eine anregende Lektüre wünschen

Patrick Scheele & Karin-Irene Eiermann

# Table of contents

## Inhaltsverzeichnis

### 6 Profile Profil

- 14 Hand in hand – making research usable  
Hand in Hand – Forschung nutzbar machen
- 18 Skilled workers in high technology  
Fachkräfte in der Hochtechnologie sichern

### 24 Highlights Schlaglichter

### 68 Photonics Photonik

- 70 The theory behind mode-hop-free tunable high-power DFB lasers
- 72 100 W distributed feedback laser with multiple epitaxially stacked active regions and tunnel junctions for LiDAR applications
- 74 Expanded research studies in diode physics and engineering, seeking ever-higher-power diode lasers
- 76 Improving quality and consistency in GaN-based laser development by introducing a modern multi-wafer epitaxy tool
- 78 Ready for systems integration: spectrally stabilized high-power high-brightness diode lasers for compact non-linear optics modules
- 80 Laser diodes emitting below 633 nm – targeting quantum photonics
- 82 Textile material identification using Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS)
- 84 Improved 226 nm LEDs for gas sensing – development from epitaxy to chip packaging

### 86 Integrated Quantum Technology Integrierte Quantentechnologie

- 88 Meeting the tough requirements of quantum sensor applications – comprehensive characterization of optical feedback and reverse gain of amplifiers
- 90 A novel miniaturized repumping module for compact strontium-based optical atomic clocks
- 92 Enabling technologies for compact atomic physics packages
- 94 CRONOS Pathfinder: an optical rubidium two-photon clock from laboratory to space
- 96 Chip-integrated solution based on diamond NV centers – enabling compact magnetic field cameras with simplified measuring principle
- 98 From micro to nano: 3D printing of metallic structures using electrodeposition and direct electron beam writing

### 100 III-V Electronics III/V-Elektronik

- 102 Intelligent RF power amplifier systems based on supply and load modulation
- 104 A combined TCAD – compact model approach for comprehensive investigation of trap impact on GaN HEMT performance
- 106 Optimized transistor technology and materials for sub-THz 6G applications
- 108 Efficient InP W-band rectifier MMICs for IoT applications and future green 6G networks
- 110 Compact scalable MIMO radar modules for millimeter-wave imaging
- 112 Targeting the next generation of electronics – AlN-based GaN-channel HEMTs on mono-crystalline AlN substrate
- 114 Vertical high-voltage GaN-based *pn*-diodes on foreign and native substrates – targeting next-generation power electronics
- 116 Improving RF performance parameters – implanted ohmic contacts for GaN transistors
- 118 Enhancing high-performance transistors – Ge-ion implantation for ohmic contact improvement in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$
- 120 Sustainable plastics processing – using microwaves for efficient polymer melting

### 122 III-V Technology III/V-Technologie

- 124 AlN-based transistor epitaxy – exploiting the excellent properties of the ultra-wide bandgap material
- 126 Exploring the potential of annealed aluminum gallium nitride for optoelectronic devices – a German-Malaysian cooperation
- 128 In situ controlled dry etching of AlGaN/GaN-based epitaxial layers – ensuring high-performance devices
- 130 Tailoring wide-bandgap material properties using implantation and activation annealing
- 132 Harnessing the advantage of adhesive assembly of distributed feedback laser over soldering

### 134 Annex Anhang

- 136 Facts & Figures  
Zahlen & Fakten
- 138 Personnel & Awards  
Personalia & Auszeichnungen
- 142 Events  
Veranstaltungen
- 146 Structure of the Institute  
Institutssstruktur
- 150 Contact  
Kontakt

# Who we are – FBH at a glance

## Wer wir sind – das FBH im Profil



The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) is an application-oriented research institute in the fields of high-frequency electronics, photonics, and quantum physics. It researches and realizes electronic and optical components, modules, and systems based on compound semiconductors. These devices are key enablers that address the needs of today's society in fields like communications, energy, health, and mobility.

Specifically, FBH develops light sources from the near-infrared to the ultra-violet spectral range: high-power diode lasers with excellent beam quality, UV light sources, and hybrid laser modules. Applications range from medical technology, high-precision metrology, and sensors to optical communications in space and integrated quantum technology. In the field of microwaves, FBH develops high-efficiency multi-functional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications, industrial sensing, and imaging as well as car safety systems. In addition, the institute fabricates laser drivers and compact atmospheric microwave plasma sources operating with energy-efficient low-voltage drivers for use in a variety of applications.

The FBH is a center of competence for III-V compound semiconductors covering the full range of capabilities, from design through fabrication to device characterization. Within Research Fab Microelectronics Germany (Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland), FBH joins forces with 12 other German research institutes, thus offering the complete micro and nanoelectronics value chain as a one-stop shop.



Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) ist eine anwendungsorientierte Forschungseinrichtung auf den Gebieten der Hochfrequenzelektronik, Photonik und Quantenphysik. Es erforscht und realisiert elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarf sfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität.

Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom nahinfraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation und integrierten Quantentechnologie. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme, für die industrielle Sensorik sowie Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Darüber hinaus entwickelt es Lasertreiber sowie kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit Niederspannungsversorgung für vielfältige Anwendungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen: vom Entwurf, über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung von Bauelementen. In der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) bündelt es sein Know-how und seine Ressourcen mit 12 weiteren Forschungseinrichtungen in Deutschland – die FMD bietet damit die komplette Wertschöpfungskette in der Mikro- und Nanoelektronik aus einer Hand.



# What we do – research topics & competencies

The FBH develops high-value products and services for its partners in the research community and industry which are tailored precisely to fit individual needs. With its Prototype Engineering Lab, the institute strengthens its cooperation with customers in industry by turning excellent research results into market-oriented products, processes, and services. The institute thereby offers its international customer base complete solutions and know-how as a one-stop agency – from design to ready-to-use modules and prototypes.

## Photonics

- high-power diode lasers: broad area & bars
- high-brightness & narrowband diode lasers
- hybrid laser modules (cw & pulsed): from NIR to UV spectral range, e.g. for biophotonics, laser sensors, ...
- nitride laser diodes for the blue & UV spectral range
- short-wave UV LEDs, e.g. for sensors, disinfection, medical & production technology, ...

## Integrated Quantum Technology

- electro-optical components & hybrid micro-integrated modules
- integrated quantum sensors based on atomic gases
- nanostructured diamond systems & materials
- quantum emitters & nanofabricated optical waveguide chips

## III-V Electronics

- GaN microwave transistors & MMICs
- advanced power amplifier concepts for the wireless infrastructure
- integrated circuits with InP HBTs for the 100...500 GHz frequency range (THz electronics)
- fast drivers for laser diodes
- compact sources for microwave plasmas
- GaN power electronics

## III-V Technology

- epitaxy (MOVPE) of GaAs- & GaN-based layer structures for devices
- (Al)GaN HVPE for bulk crystal growth
- in situ control techniques for MOVPE & HVPE
- complete process line 2" – 4" for GaAs, InP, SiC & GaN devices, including laser micro processing
- InP HBT technology for mm-wave & THz applications, hetero-integrated SiGe-BiCMOS/InP-HBT foundry with IHP
- mounting & assembly
- simulation of electro-magnetic fields, components & complex modules
- using AI for quality assurance & test evaluation

## Science Management

- research management & transfer
- education & training management

# Was wir tun – Forschungsthemen & Kompetenzbereiche

Für Partner aus Forschung und Industrie entwickelt das FBH hochwertige Produkte und Services, die exakt auf individuelle Anforderungen zugeschnitten sind. Mit seinem EntwicklungsZentrum überführt das FBH exzellente Forschungsergebnisse in marktorientierte Produkte, Verfahren und Dienstleistungen und stärkt dadurch die Zusammenarbeit mit seinen Industriekunden. Das Institut bietet somit seinem internationalen Kundenstamm Know-how und Komplettlösungen aus einer Hand: vom Entwurf über gebrauchsfertige Module bis hin zu industrietauglichen Prototypen.

## Photonik

- Hochleistungs-Diodenlaser: Breitstreifen & Barren
- Hochbrillante & spektral schmalbandige Diodenlaser
- Hybride Lasermodule (CW & gepulst): NIR bis UV-Spektralbereich, u. a. für Biophotonik, Lasersensorik, ...
- Nitrid-Laserdioden für den blauen & UV-Spektralbereich
- Kurzwellige UV-Leuchtdioden, u. a. für Sensorik, Desinfektion, Medizin- & Produktionstechnik, ...

## Integrierte Quantentechnologie

- Elektrooptische Komponenten & hybrid mikrointegrierte Module
- Integrierte Quantensensoren auf Basis atomarer Gase
- Nanostrukturierte Diamantsysteme & -materialien
- Quantenemitter & nanofabrizierte Lichtwellenleiterchips

## III/V-Elektronik

- GaN-Mikrowellentransistoren & -MMICs
- Neue Leistungsverstärkerkonzepte für die drahtlose Infrastruktur
- Integrierte Schaltungen mit InP-HBTs für den Frequenzbereich 100...500 GHz (THz-Elektronik)
- Schnelle Treiber für Laserdioden
- Kompakte Quellen für Mikrowellenplasmen
- GaN-Leistungselektronik

## III/V-Technologie

- Epitaxie (MOVPE) von GaAs- & GaN-basierten Schichtstrukturen für Bauelemente
- (Al)GaN-HVPE für Volumenkristalle
- In-situ Kontrolltechniken bei MOVPE & HVPE
- Komplette Prozesslinie 2" – 4" für GaAs-, InP-, SiC- & GaN-Bauelemente inklusive Lasermikrostrukturierung
- InP-HBT-Technologie für Millimeterwellen- & THz-Anwendungen, heterointegrierter SiGe-BiCMOS-/InP-HBT-Foundryprozess mit dem IHP
- Aufbau- & Verbindungstechnik
- Simulation von elektromagnetischen Feldern, Komponenten & komplexen Modulen
- Einsatz von KI zur Qualitätssicherung & Auswertung von Tests

## Wissenschaftsmanagement

- Forschungsmanagement & Transfer
- Bildungsmanagement

# What we offer – technology transfer & services

The Ferdinand-Braun-Institut transfers its know-how and results in many different ways – and for an abundance of applications. The respective labs and departments develop sophisticated and tailor-made solutions for their customers in research and industry. FBH's Prototype Engineering Lab complements the institute's scientific competence with its user-friendly plug & play systems.

The institute's multifaceted approach ensures that research results are quickly transferred into market-oriented products, processes, and services.

## Scientific services

Based on its comprehensive know-how and state-of-the-art equipment, FBH offers a wide spectrum of scientific services for various applications. Services range from customer-specific epitaxial layer structures in excellent quality to the development of novel process steps and products such as tailor-made laser diodes or transistors. The customer portfolio comprises major companies as well as small- and medium-sized enterprises (SMEs). For SMEs, in particular, the FBH is often an indispensable part in their own value-added chain, since running an elaborate infrastructure like a cleanroom is hardly economically viable for small companies.

## Application development

The in-house Prototype Engineering Lab develops and builds prototypes based on systematic device engineering, thus demonstrating FBH's research results in operational devices. The team of engineers and technicians works closely with all labs and departments of the institute. The Prototype Engineering Lab lends or sells the resulting prototypes to customers for testing in their own applications.

## Research management & transfer

The interdisciplinary team of FBH's Science Management Department supports not only the scientists of the institute but also partners from science and industry in projects and joint R&D activities. It takes care of administrative and organizational work involved in applying for complex collaborative projects and international networks, subsequently coordinating, developing, and managing the joint activities.

# Das bieten wir Ihnen – Technologietransfer & Services

Das Ferdinand-Braun-Institut transferiert sein Know-how und seine Ergebnisse in vielfältiger Weise – und für eine Fülle von Anwendungen. Die jeweiligen Labs und Departments entwickeln anspruchsvolle und maßgeschneiderte Lösungen für ihre Kunden in Forschung und Industrie. Das EntwicklungsZentrum ergänzt die wissenschaftliche Kompetenz des Instituts mit seinen benutzerfreundlichen Plug-&-Play-Systemen.

Der breit gefächerte Ansatz des Instituts stellt sicher, dass Forschungsergebnisse schnell in marktgerechte Produkte, Prozesse und Dienstleistungen umgesetzt werden.

## Forschungsdienstleistungen

Auf Basis seines umfangreichen Know-hows und modernster Ausstattung bietet das FBH ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Dienstleistungen für verschiedenste Anwendungen. Das Leistungsspektrum reicht von kundenspezifischen epitaktischen Schichtstrukturen in exzellenter Qualität bis hin zur Entwicklung neuer Prozessschritte und Produkte wie etwa maßgeschneiderte Laserdioden oder Transistoren. Das Kundenportfolio umfasst sowohl Großunternehmen als auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Gerade für KMU ist das FBH oftmals unverzichtbar für die eigene Wertschöpfungskette, da der Betrieb einer aufwändigen Infrastruktur wie eines Reinraums für kleine Unternehmen kaum wirtschaftlich möglich ist.

## Applikationsentwicklung

Das institutseigene EntwicklungsZentrum entwickelt und baut benutzerfreundliche Prototypen auf der Basis systematischer Geräteentwicklung und demonstriert damit Forschungsergebnisse des FBH in einsatzfähigen Geräten. Das Team aus Ingenieuren und Technikern arbeitet dabei eng mit allen Labs und Departments des Instituts zusammen. Die hierbei entstehenden Prototypen verleiht oder verkauft das EntwicklungsZentrum an Kunden für Tests in deren eigenen Anwendungen.

## Forschungsmanagement & Transfer

Das interdisziplinäre Team aus dem Wissenschaftsmanagement des FBH unterstützt nicht nur die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts, sondern auch Partner aus Wissenschaft und Industrie bei Projekten und F&E-Kooperationen. Es kümmert sich um administrative und organisatorische Arbeiten bei der Beantragung komplexer Verbundprojekte und internationaler Netzwerke. Zudem koordiniert, entwickelt und verwaltet es die gemeinsamen Aktivitäten.

# What is important to us Was uns wichtig ist

## Mission statement ... translating ideas into innovation

- We explore **cutting-edge technologies for innovative applications** in the fields of high frequency electronics, photonics and integrated quantum technology. As a center of competence for III-V compound semiconductors, we are part of a worldwide network and achieve research results advancing the international state-of-the-art.
- We offer **complete solutions as a one-stop agency** – from design to ready-to-ship modules.
- We work **closely cross-linked** with the scientific community – including university cooperations (joint labs), strategic networks, and international projects.
- In **strategic partnerships with industry**, we transfer our research results into cutting-edge products and thus ensure German technological leadership in microwaves and optoelectronics. By means of spin-off companies, we bring innovative product ideas into the market.
- We provide **high-value products and services** for our customers in the research community and industry which are tailored to fit their individual needs.
- We offer our employees an **attractive and family-friendly working environment** with interesting tasks and career prospects. To maintain top-level expertise we guide, assist, and encourage young scientists and train our staff.
- We promote an **affirmative, open-minded, and diverse working environment**. For example, we specifically aim at increasing the proportion of female specialists and executive staff in the technical and scientific area and actively assist foreign colleagues with their integration.
- Wir erforschen **Schlüsseltechnologien für innovative Anwendungen** in der Hochfrequenz-Elektronik, Photonik und integrierten Quantentechnologie. Als Kompetenzzentrum für Verbindungshalbleiter arbeiten wir weltweit vernetzt und erzielen Forschungsergebnisse auf internationalem Spitzenniveau.
- Wir bieten **Lösungen aus einer Hand**: vom Entwurf bis zum lieferfähigen Modul.
- Wir arbeiten **eng vernetzt** mit der Scientific Community: im Rahmen von Hochschulkooperationen (Joint Labs), strategischen Verbünden und in internationalen Projekten.
- Wir setzen unsere Forschung in **strategischen Partnerschaften mit der Industrie** in praktische Anwendungen um und sichern so die technologische Kompetenz Deutschlands in der Höchstfrequenztechnik. Innovative Produktideen transferieren wir erfolgreich durch Spin-offs.
- Wir offerieren **hochwertige Produkte und Services**, die exakt auf die Anforderungen unserer Kunden zugeschnitten sind.
- Wir bieten unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ein stabiles, **attraktives und familienfreundliches Arbeitsumfeld** mit reizvollen Aufgabenstellungen und Entfaltungsmöglichkeiten. Unsere Zukunft sichern wir durch die gezielte Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die Ausbildung technischer Fachkräfte.
- Wir fördern ein **anerkennendes, aufgeschlossenes und vielfältiges Arbeitsumfeld**. Wir haben es uns beispielsweise zur Aufgabe gemacht, den Anteil weiblicher Fach- und Führungskräfte im technischen und naturwissenschaftlichen Bereich gezielt zu erhöhen sowie ausländische Kolleginnen und Kollegen aktiv bei der Integration zu unterstützen.

## Our Prototype Engineering Team.



# Hand in hand – making research usable

## Hand in Hand – Forschung nutzbar machen

FBH's in-house Prototype Engineering Lab helps to bridge the gap between research and industry, ensuring that excellent research results are transferred even faster into market-oriented products, processes, and services. Our high-level integration yet easy-to-handle systems enable partners to conveniently test FBH's R&D results in their applications – in simple plug & play operation. With our user-friendly, industry-suited prototypes we also support product development in small- and medium-sized companies.

### Path to the prototype | Der Weg zum Prototyp:



#### Path to the prototype:

Integrating novel research modules into prototypes is technically challenging. Flexibility in operation parameters is key, as the exact specifications of the application are often not clearly defined at the beginning of development. Also, devices should be compact and easy to operate, even by personnel without specialized knowledge of the respective system. Thus, we always keep the application and intuitive operation in mind.

Our team combines the interdisciplinary know-how of physicists, engineers, and technicians with the skills of our colleagues in the fine mechanics workshop to create tailor-made solutions. When integrating laser modules, for example, the arrangement of the laser in an optical path is crucial, while in the case of LEDs, homogeneous light distribution is decisive. To optimally position the various components along with optics or reflectors,



❹ Prototype of the direct-diode additive manufacturing system developed within the SAMBA project, ready for mounting on a light-weight construction processing robot (in collaboration with SKDK GmbH & Photon Laser Manufacturing GmbH).  
Prototyp des Direktdioden-Systems aus dem SAMBA-Projekt für die additive Fertigung, vor der Montage an einen Leichtbau-Bearbeitungsroboter (in Zusammenarbeit mit SKDK GmbH & Photon Laser Manufacturing GmbH).

comprehensive simulations are carried out. Temperature control is another important aspect. We manufacture individual solutions using active or passive cooling elements with optimal thermal coupling to the research components. To ensure plug & play operation, the prototypes include space-saving power supplies as well as microcontrollers that allow users to precisely control the operating parameters. The final result is a compact functional housing with a high-precision arrangement of all (opto-)electronic and mechanical components, operated with a commercially available plug-in or desktop power supply.

Every prototype development also includes the programming of software. In addition to the firmware of integrated microprocessors, we develop a Graphical User Interface (GUI) application to set and monitor the operating parameters, which is intuitive to use.

#### Customized solutions for special applications

Within the SAMBA project, we have developed an extremely compact kilowatt-class direct-diode laser process head designed for use in additive manufacturing together with our High-Power Diode Lasers Lab, see also article on p. 32. This laser system will be used to produce customized side panels for high-speed trains with significantly reduced weight. In order to automate the process, the direct-diode laser process head will be integrated into a maneuverable robotic arm. To keep the overall weight low, we extensively used 3D printing to fabricate light-weight and stable stainless-steel components, such as cooling liquid connectors and frames for the laser optics. As a result, the first SAMBA prototype is compact and low-weight, with exterior dimensions of only 21 cm x 29 cm x 61 cm and a total weight of 12.5 kg. These key figures even include the wire feeding system, process monitoring camera as well as the electrical and liquid-cooling connections. Driver electronics and cooling system have also been designed such that the standalone system can be used for laser-assisted wire deposition of aluminum.

Its excellent properties make the system ideally suited for further applications in industrial production.

We have also developed a range of plug & play laser driver systems with intuitive Graphical User Interface (GUI). They enable partners to conveniently test FBH's laser diodes and modules in their applications. One such example is the pulse laser driver integrated into a 14-pin butterfly mount, designed for use with FBH's high-power pulsed laser sources. It is suited for a broad range of applications including LiDAR (Light Detection and Ranging). The system delivers pulse powers up to 20W at 3 ns or 200W at 10 ns at a stabilized wavelength of 905 nm in a temperature range from 25 °C to -45 °C. Further technical details of a typical laser source that can be used with this driver system are provided on p. 72. The system can be controlled by any device, e.g., computer, tablet, and smartphone, thus enabling the user to easily configure the operational parameters of the laser, such as temperature, voltage, and current.



❺ FBH high-power pulsed laser source for LiDAR applications as plug & play solution (BFM-14/PLD). Hochleistungs-Pulslasersquelle aus dem FBH für LiDAR-Anwendungen als Plug-&-Play-Lösung (BFM-14/PLD).

## Forschung nutzbar machen – das EntwicklungsZentrum

Unser EntwicklungsZentrum am FBH schlägt die Brücke zwischen Forschung und Industrie und sorgt dafür, dass exzellente Forschungsergebnisse noch schneller in marktgerechte Produkte, Verfahren und Dienstleistungen umgesetzt werden.

Unsere hochintegrierten und zugleich einfach bedienbaren Systeme ermöglichen es Partnern, FBH-Forschungsergebnisse bequem in ihren Anwendungen zu testen – im einfachen Plug-&-Play-Betrieb. Mit den anwenderfreundlichen, industrietauglichen Prototypen unterstützen wir auch die Produktentwicklung in kleinen und mittleren Unternehmen.

Die Integration neuartiger Forschungsmoduln in Prototypen ist technisch anspruchsvoll. Betriebsparameter müssen sich flexibel einstellen lassen, da die genauen Spezifikationen der Anwendung zu Beginn der Entwicklung oft nicht klar definiert sind. Die Geräte sollen zudem kompakt und einfach zu bedienen sein – auch von Personal ohne spezielle Kenntnisse des jeweiligen Systems. Daher behalten wir stets die Anwendung und die intuitive Bedienung im Blick.

Unser Team kombiniert das interdisziplinäre Know-how von Physiker\*innen, Ingenieur\*innen und Techniker\*innen mit den Fähigkeiten unserer Kolleg\*innen der feinmechanischen Werkstatt. Bei der Integration von Lasermodulen beispielsweise ist die Anordnung des Lasers im Strahlengang entscheidend, bei LEDs muss das Licht homogen auf der Zielfläche verteilt werden. Um die verschiedenen Komponenten sowie Optiken oder Reflektoren optimal zu positionieren, führen wir umfangreiche Simulationen durch. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Temperaturkontrolle. Wir fertigen individuelle Lösungen mit aktiven oder passiven Kühllementen, die thermisch optimal an die Forschungskomponenten gekoppelt werden. Um den Plug-&-Play-Betrieb zu gewährleisten, enthalten die Prototypen platzsparende Netzzeile sowie Mikrocontroller, mit denen Anwender\*innen die Betriebsparameter präzise steuern können. Das Ergebnis ist ein kompaktes Funktionsgehäuse mit einer hochpräzisen Anordnung aller (opto-)elektronischen und mechanischen Komponenten. Das System selbst lässt sich mit einem handelsüblichen Stecker- oder Tischnetzteil betreiben.

Zu jeder Prototypen-Entwicklung gehört auch die Programmierung von Software. Zusätzlich zu der Firmware der integrierten Mikroprozessoren entwickeln wir eine intuitiv zu bedienende grafische Benutzeroberfläche (GUI), mit der sich Betriebsparameter einstellen und überwachen lassen.

#### Passgenaue Lösungen für spezielle Herausforderungen

Gemeinsam mit dem High-Power Diode Lasers Lab haben wir im SAMBA-Projekt einen extrem kompakten Direktdiodenlaser-Prozesskopf der Kilowattklasse für den Einsatz in der additiven Fertigung entwickelt – weitere Informationen dazu auf S. 34. Mit dem Lasersystem sollen unter anderem maßgeschneiderte Seitenteile für Hochgeschwindigkeitszüge mit deutlich reduziertem Gewicht hergestellt werden. Um den Prozess zu automatisieren, wird der Direktdiodenlaser-Prozesskopf in einen beweglichen Roboterarm integriert. Um das Gesamtgewicht gering zu halten, stellen wir leichte und stabile Edelstahlkomponenten oft mithilfe von 3D-Druck her. Damit haben wir beispielsweise Anschlüsse für Kühlflüssigkeit und Rahmen für die Laseroptik gefertigt. Im Ergebnis ist ein kompakter und leichter SAMBA-Prototyp entstanden mit Außenmaßen von 21 cm x 29 cm x 61 cm und einem Gesamtgewicht von 12,5 kg. Darin integriert ist sowohl das Drahtführungssystem, die Kamera zur Prozessüberwachung sowie die elektrischen Anschlüsse und jene für die Flüssigkeitskühlung. Treiberelektronik und Kühlsystem sind so ausgelegt, dass das Standalone-System für das Laser-Drahtauftragen von Aluminium eingesetzt werden kann. Seine exzellenten Eigenschaften machen dieses System für weitere Anwendungen in der industriellen Produktion interessant.

Zudem haben wir eine Reihe von Plug-&-Play-Lasertreiber-systemen mit intuitiver Benutzeroberfläche entwickelt. Partner können damit die Laserdioden und -module des FBH bequem in ihren Anwendungen testen. Ein Beispiel dafür ist der Puls-laser-Treiber im 14-Pin-Butterfly-Mount, der für den Einsatz mit den gepulsten Hochleistungslaserquellen des FBH entwickelt wurde. Diese Laser sind für eine breite Anwendungspalette einschließlich LiDAR (Light Detection and Ranging) ausgelegt. Das System liefert Pulselistungen bis zu 20W bei 3 ns oder 200W bei 10 ns bei einer stabilisierten Wellenlänge von 905 nm in einem Temperaturbereich von 25 °C bis zu -45 °C. Weitere technische Details einer typischen Laserquelle, die mit diesem Treibersystem verwendet werden kann, finden Sie auf S. 72. Das System lässt sich von jedem Gerät (z. B. PC, Tablet, Smartphone) aus steuern. Benutzer können so die Betriebsparameter des Lasers, wie Temperatur, Spannung und Strom, unkompliziert konfigurieren.

## Our Vocational Training & Education Team.



# Skilled workers in high technology

## Fachkräfte in der Hochtechnologie sichern

Attracting bright minds for research and development in high technology has been a priority for the Ferdinand-Braun-Institut for more than 25 years. We are committed to securing skilled workers in the academic field as well as in vocational education and training.

We actively engage in academic teaching and training, closely collaborating with universities. Currently, fourteen scientists from our institute teach at seven different universities and colleges. They also support young academics by supervising Bachelor's and Master's theses and doctorates. An intensive exchange with academic staff also takes place with postdocs and students conducting research within the framework of the nine joint labs both at FBH and at the respective partner universities.

In traditional vocational training, FBH offers four to five apprenticeships per year in microtechnology. We also provide training in two other professions: Industrial mechanic and IT specialist for system integration.

Kluge Köpfe für Forschung und Entwicklung in der Hochtechnologie gewinnen! Seit mehr als 25 Jahren engagiert sich das Ferdinand-Braun-Institut in der Fachkräftesicherung im akademischen Bereich sowie der beruflichen Aus-, Fort- und Weiterbildung.

Wir beteiligen uns aktiv an der akademischen Lehre und Ausbildung und sind eng mit Hochschulen vernetzt. Vierzehn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unseres Instituts lehren derzeit an sieben verschiedenen Universitäten und Hochschulen. Sie unterstützen den wissenschaftlichen Nachwuchs zudem durch die Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen. Ein intensiver Austausch mit akademischem Personal findet auch bei Postdocs und Studierenden statt, die im Rahmen der aktuell neun Joint Labs sowohl am FBH als auch an den jeweiligen Partnerhochschulen forschen.

Im Bereich der klassischen Berufsausbildung bietet das FBH pro Jahr vier bis fünf Ausbildungsplätze in der Mikrotechnologie an. Darüber hinaus bilden wir in zwei weiteren Berufen aus: Industriemechaniker\*in und Fachinformatiker\*in für Systemintegration.

## High Technology Education and Training Network – ANH Berlin

Through ANH Berlin (Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie), founded in 2007, we have established a framework at FBH that strengthens vocational training well beyond the scope of the institute. The ANH Berlin team supports companies and research institutions in nurturing the next generation of industrial and technical talent. Getting young people interested in dual vocational training in the high-tech sector remains a major challenge. Many job profiles are still too little known or are considered "too boring" or "too demanding". ANH Berlin makes future-oriented professions tangible and gives young people an insight into real working environments. Other offers are aimed at multipliers such as teachers, career advisors and parents. Thus, the network actively helps to bridge the gap between school and professional life.

Led by ANH Berlin, eight partners are shaping the Microtec Academy – a supra-regional vocational training academy tailored specifically to the highly diversified high-tech sector. Companies benefit from competent advice and tailored offerings ranging from training and advanced training to targeted personnel development. Since the start of the project, more than 60 different modules for various qualification and learning levels, adaptable through a modular system, have been tested with approximately 2,000 participants. The virtual technology lab – a kind of flight simulator for microtechnologists – supports the teaching of cleanroom skills regardless of location and time. The Microtec Academy's training courses are accessible via the website with integrated learning platform: [www.microtec-academy.de](http://www.microtec-academy.de)

### Tailored initial, further and continuing training in key technologies

As part of the InnoVET project BM =  $x^3$ , funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), structural innovations in vocational education and training for micro- and nanotechnologies are being developed and implemented.



## Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie – ANH Berlin

Mit dem 2007 gegründeten Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie (ANH Berlin) haben wir am FBH eine Struktur geschaffen, die die berufliche Bildung weit über das Institut hinaus stärkt. Das ANH Berlin-Team unterstützt Unternehmen und Forschungseinrichtungen dabei, den gewerblich-technischen Nachwuchs zu sichern. Jugendliche für die duale Ausbildung im Hightech-Bereich zu begeistern, bleibt dabei eine große Herausforderung. Nach wie vor sind

viele Berufsbilder zu wenig bekannt oder werden als „zu langweilig“ oder „zu anspruchsvoll“ eingeschätzt. ANH Berlin macht zukunftsweisende Berufe greifbar und ermöglicht Jugendlichen Einblicke in reale Arbeitswelten. Weitere Angebote richten sich an Multiplikator\*innen wie Lehrkräfte, Berufsberater\*innen und Eltern. Damit hilft das Netzwerk aktiv dabei, die Brücke zwischen Schule und Berufsleben zu schlagen.



### Passgenaue Aus-, Fort- und Weiterbildung in Schlüsseltechnologien

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten InnoVET-Projekts BM =  $x^3$  werden strukturelle Innovationen in der beruflichen Bildung für Mikro- und Nanotechnologien entwickelt und umgesetzt.

Unter Leitung von ANH Berlin konzipieren acht Verbundpartner die Microtec Academy – eine überregionale Berufsbildungsakademie, die speziell auf den stark diversifizierten Hochtechnologiebereich zugeschnitten ist. Unternehmen erhalten kompetente Beratung und passgenaue Angebote von der Ausbildung über Aufstiegsfortbildungen bis hin zur gezielten Personalentwicklung. Seit Projektstart wurden mehr als 60 verschiedene Module für unterschiedliche Qualifika-

tionsstufen und Lernniveaus, die nach einem Baukastensystem zusammengestellt werden können, mit ca. 2.000 Teilnehmer\*innen erprobt. Das Virtuelle Technologielabor – eine Art Flugsimulator für Mikrotechnolog\*innen – unterstützt bei der orts- und zeitunabhängigen Vermittlung von Reinraumkenntnissen. Die Qualifizierungsangebote der Microtec Academy sind über die Webpräsenz mit integrierter Lernplattform zugänglich: [www.microtec-academy.de](http://www.microtec-academy.de)



## Inspiring young talent for STEM – highlights from the 2023 events

### Adlershof Training Alliance

In June, approximately 100 students from year 9 and above visited the Adlershof Training Alliance to explore training companies and careers within the high-tech sector at the Science and Technology Park. The young people took a look behind the scenes of companies and research facilities at the Adlershof site. In small groups of no more than 15 individuals, they each toured two facilities out of more than 20 – including the Ferdinand-Braun-Institut. Employees and trainees provided insights into their day-to-day work and typical tasks, requirements and training opportunities at the company. They gave interested visitors tips on how to pursue a career in the high-tech sector. Eleven network partners answered further questions at their stands during the accompanying training fair.

### Girls' Technology Congress

The Girls' Technology Congress, organized by ANH in October, proved to be a complete success. A total of 120 girls stepped into the role of a researcher, programmer or laboratory assistant for a day. The event kicked off with a joint introduction, during which tech influencers shared their experiences in STEM professions. The event continued with a magic chemistry show and the career orientation fair. Subsequently, the girls engaged in hands-on science and technology workshops, where they had the opportunity to explore various aspects firsthand. The response to the event was decidedly positive, with over 90 % approval. Participants expressed delight in being able to try out new things and appreciated the clear explanations throughout the event.



Ausbildungs-Allianz-Adlershof:  
The students were given insight into the world of tiny microchips and were able to find out about career opportunities in the high-tech sector at the accompanying trade fair.

Ausbildungs-Allianz-Adlershof:  
Die Schüler\*innen bekamen Einblicke in die Welt der winzigen Mikrochips und konnten sich bei der begleiteten Messe über Karrieremöglichkeiten im High-tech-Bereich informieren.



↑ Wire bending during the precision engineering workshop at FBH.  
Drahtbiegen beim Workshop in der feinmechanischen Werkstatt am FBH.

## New target groups to secure skilled workers – career change for the future

In 2023, the association proANH e.V., of which FBH is also a member, developed and tested an innovative concept in cooperation with the Agentur für Arbeit Berlin-Südost (Federal Employment Agency Berlin-Southeast), and the bbw Bildungswerk der Wirtschaft (Educational Organization for the German Economy). This concept is the "Electronics Production Specialist" training course, which was specially designed for career changers. Over the course of five months, participants undergo training tailored to specific cleanroom and laboratory work. The program begins with four months of theoretical instruction covering, e.g., electrical engineering, chemistry, semiconductor, microsystems and device technology. The next step is a four-week company internship, during which they can solidify their knowledge. The program has been a great success: a total of 21 new employees were recruited in the first two rounds – including Onur Sahin, who has been working in FBH's Process Technology since October 2023.

## Neue Zielgruppen zur Fachkräftesicherung – beruflicher Quereinstieg in die Zukunft

Der Verein proANH e.V., dem auch das FBH angehört, hat im Jahr 2023 in Kooperation mit der Agentur für Arbeit Berlin-Südost und dem bbw Bildungswerk der Wirtschaft ein innovatives Konzept entwickelt und erprobt. Dabei handelt es sich um die Fortbildung zur „Fachkraft Elektronikfertigung“, die speziell für Quereinsteiger\*innen konzipiert wurde. Innerhalb von fünf Monaten werden die Teilnehmenden für spezifische Tätigkeiten im Reinraum und in Laboren fit gemacht. In den ersten vier Monaten erlernen sie theoretische Grundlagen, beispielsweise in der Elektrotechnik, Chemie, Halbleiter-, Mikrosystem- und Gerätetechnik. Darauf folgt ein vierwöchiges betriebliches Praktikum, in dem sie ihre Kenntnisse verfestigen können. Ein großer Erfolg: In den ersten beiden Durchgängen konnten insgesamt 21 neue Mitarbeiter\*innen gewonnen werden – darunter Onur Sahin, der seit Oktober 2023 in der Prozesstechnologie am FBH arbeitet.

## Nachwuchs für MINT begeistern – Veranstaltungs-Highlights 2023

### Ausbildungs-Allianz-Adlershof

Rund 100 Schülerinnen und Schüler ab der 9. Klasse besuchten im Juni die Ausbildungs-Allianz-Adlershof, um Ausbildungsbetriebe und Berufsfelder der Hightech-Branche im Wissenschafts- und Technologiepark kennenzulernen. Die Jugendlichen warfen einen Blick hinter die Kulissen von Unternehmen und Forschungseinrichtungen am Standort Adlershof. In kleinen Gruppen von maximal 15 Personen besuchten sie je zwei von mehr als 20 Einrichtungen vor Ort – darunter auch das Ferdinand-Braun-Institut. Mitarbeitende und Auszubildende gewährten Einblicke in ihren Arbeitsalltag und typische Tätigkeiten, Anforderungen und Ausbildungsberufe des Unternehmens. Den Interessierten gaben sie Tipps für den Einstieg in die Hightech-Branche. Elf Netzwerkpartner beantworteten weitere Fragen an ihren Ständen auf der begleitenden Ausbildungsmesse.

### Mädchen-Technik-Kongress

Der von ANH Berlin organisierte Mädchen-Technik-Kongress im Oktober war ein voller Erfolg. Insgesamt 120 Mädchen schlüpften für einen Tag in die Rolle einer Forscherin, Programmiererin oder Laborantin.

Die Veranstaltung begann mit einer gemeinsamen Einführung, in der Tech-Influencerinnen ihre Erfahrungen aus MINT-Berufen teilten. Weiter ging es mit einer Zauber-Chemie-Show und der Berufsorientierungs-Messe. Anschließend konnten die Mädchen in zweistündigen Workshops Naturwissenschaft und Technik praktisch erleben und selbst ausprobieren. Die Resonanz auf die Veranstaltung war mit über 90 % Zustimmung ausgesprochen positiv. Die Teilnehmerinnen waren begeistert, dass sie neue Dinge ausprobieren konnten und alles gut erklärt wurde.



↑ Soldering workshop by Jugend hackt as part of the Girls' Technology Congress 2023.  
Lötworkshop von Jugend hackt im Rahmen des Mädchen-Technik-Kongresses 2023.

# Highlights

## Schlaglichter



Robert Weigel's entertaining presentation made the audience laugh out loud.

Der unterhaltsame Vortrag von Robert Weigel sorgte für viele Lacher bei den Zuhörenden.

Karin-Irene Eiermann during her laudatory speech at the reception.

Karin-Irene Eiermann bei ihrer Laudatio auf dem Empfang.



## Passing the baton: Patrick Scheele takes over as scientific managing director from Günther Tränkle

Günther Tränkle, who successfully led our institute for 28 years, handed over the scientific leadership role to Patrick Scheele at the turn of the year. The management position is associated with the W3 professorship for "Microwave and Optoelectronics" at Technische Universität Berlin. Patrick Scheele comes from Hensoldt Sensors GmbH in Ulm and has been familiar with FBH for many years – as a member and, since 2017, as the chairman of the scientific advisory board. At Hensoldt, he led several large research and development teams with up to 950 employees as Vice President and Head of Radar Engineering. In addition to high-frequency electronics with circuit and antenna development, he was also responsible for digital electronics, mechanical design, and radar software and system engineering.

We officially celebrated this leadership change in March 2024 with a scientific colloquium, followed by a reception. Longtime companions paid tribute to the achievements of Professor Tränkle, to whom our institute owes its international visibility. Rapidly applying research results was always particularly important to the native Swabian. The related efforts are reflected not only in close collaborations with both regional and international companies but also in the ten spin-offs, most of which are still active today. As Executive Board Representative of the Leibniz Association, he actively promoted technology transfer and was also a member and chairman of various scientific advisory boards. In addition to his professorship at Technische Universität Berlin, Günther Tränkle was actively involved in nu-

merous other committees and advisory boards, including the National Academy of Science and Engineering – acatech. With Günther Tränkle, FBH bids farewell to a personality who, with much passion, idealism, humanity, and above-average commitment, has steered the institute's fortunes for many years. He always had the success of the institute as a whole in mind and felt personally responsible for it. FBH's dynamic development can be largely attributed to his personal dedication.

The colloquium concluded with the laudatory speech "More than Spätzle: Research at its Best" by Robert Weigel of Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. The humorous lecture set the tone for the subsequent reception. There, greetings followed from funding bodies, academic and industrial partners, and a laudation by the administrative managing director, Karin-Irene Eiermann. Patrick Scheele, Tränkle's successor, provided an outlook on the future focus areas of the Ferdinand-Braun-Institut.

» "More than Spätzle: Forschung at its Best"

## Staffelübergabe: Patrick Scheele übernimmt wissenschaftliche Leitung von Günther Tränkle

Günther Tränkle, der unser Institut 28 Jahre lang erfolgreich führte, hat die wissenschaftliche Leitung zum Jahreswechsel an Patrick Scheele übergeben. Damit verbunden ist die W3-Professur für das Fachgebiet „Mikrowellen- und Optoelektronik“ an der Technischen Universität Berlin. Patrick Scheele kommt von der Hensoldt Sensors GmbH in Ulm und kennt das FBH bereits seit vielen Jahren – als Mitglied und ab 2017 auch als Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats. Bei Hensoldt leitete er zuletzt als Vice President und Head of Radar Engineering mehrere große Forschungs- und Entwicklungs-Teams mit bis zu 950 Mitarbeitenden. Neben der Hochfrequenzelektronik mit Schaltungs- und Antennenentwicklung verantwortete er unter anderem die Digitalelektronik, mechanische Konstruktion sowie die Radar-Software- und Systementwicklung.

Diesen Führungswechsel haben wir mit einem wissenschaftlichen Kolloquium und anschließendem Empfang im März 2024 offiziell gefeiert. Dabei würdigten langjährige Wegbegleiterinnen und Wegbegleiter die Verdienste von Professor Tränkle, dem unser Institut seine internationale Sichtbarkeit zu verdanken hat. Dass Forschungsergebnisse rasch in die Anwendung kommen, war dem gebürtigen Schwaben stets besonders wichtig. Das spiegeln nicht nur die engen Kooperationen mit regionalen wie international agierenden Unternehmen wider, sondern auch die zehn Ausgründungen, von denen die meisten noch heute aktiv sind. Als Präsidiumpunkttragter der Leibniz-Gemeinschaft kümmerte er sich aktiv um den Technologietransfer und war zudem Mitglied oder Vorsitzender diverser wissenschaftlicher Beiräte. Neben seiner Professur an der Technischen Universität Berlin war Günther Tränkle in zahlreichen weiteren Gremien und Beiräten aktiv, unter anderem bei der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften – acatech. Mit Günther Tränkle verlässt eine Persön-

lichkeit das FBH, die mit viel Herzblut, Leidenschaft, Idealismus, Menschlichkeit und überdurchschnittlichem Engagement die Geschicke unseres Instituts über viele Jahre hinweg gelenkt hat. Stets hatte er dabei den Erfolg des Instituts als Ganzes im Blick und fühlte sich persönlich dafür verantwortlich. Die dynamische Entwicklung des FBH ist in weiten Teilen seinem persönlichen Einsatz zu verdanken.

Das Kolloquium endete mit der Laudatio „More than Spätzle: Forschung at its Best“ von Robert Weigel, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Der launige Vortrag setzte die Stimmung für den anschließenden Empfang. Dort folgten Grußworte von Zuwendungsgebern, akademischen und industriellen Partnern sowie eine Laudatio der administrativen Geschäftsführerin Karin-Irene Eiermann. Einen Ausblick in die künftigen Schwerpunktsetzungen des Ferdinand-Braun-Instituts gab Tränkles Nachfolger Patrick Scheele.



Patrick Scheele and Günther Tränkle at the scientific colloquium. Patrick Scheele und Günther Tränkle beim wissenschaftlichen Kolloquium.



↑ Wolfgang Heinrich (left) during the panel discussion at the Green ICT event on energy-efficient information and communication technology.

Wolfgang Heinrich (li.) während der Podiumsdiskussion des Green ICT-Events zu energieeffizienter Informations- und Kommunikationstechnik.

## FMD topics in focus – green communication technologies, novel computing technology, and technology sovereignty

The FBH is one of the 13 institutes cooperating within the Research Fab Microelectronics Germany (FMD). With around 4,600 employees in total, the FMD brings together a unique range of expertise and infrastructure under one roof. This makes it a central point of contact for all micro and nanoelectronics related research and development issues in Germany and Europe.

As part of the major project **Green ICT @ FMD**, which has been funded by the BMBF since fall 2022, a cross-site competence center for resource-conscious information and communication technology (ICT) is being created. The participating institutes are working on the eco-balancing of ICT components and systems and are providing suitable measurement environments for partners in industry and science. We are involved in the fields of power converters and wireless communication (digitization, mm-wave transceivers and 140 gigahertz links). We

also coordinate of the three technical focal points of the competence center, the "energy-saving communication infrastructures" hub.

Last year, we expanded our measurement facilities for transceivers at frequencies of up to 67 gigahertz with regard to energy balancing and prepared the installation of an outdoor link at 140 gigahertz. Together with our partners, we also evaluated the carbon footprint of a D-band radio link for the first time. Since the beginning of 2024, we have also been scrutinizing the ecological impact of our indium phosphide process: from materials to energy consumption during manufacturing.

The **FMD-QNC** project, which was launched at the end of 2022, addresses fast quantum (Q) and neuromorphic computing (NC) as a prerequisite for new types of computing technologies. Computing-intensive technologies and applications, such as

artificial intelligence, are increasingly pushing conventional digital computers to their performance limits. In the FMD-QNC project, the partners are working together to build a technological infrastructure for quantum computing – with hardware that supports researchers and companies in their efforts to develop customized microelectronics, scalable manufacturing and integration processes, and application-oriented testing of highly complex computing technologies. In order to create optimal conditions for this, we are currently investing in a new high-performance stepper for photolithography and optoelectronic heterointegration equipment at FBH.

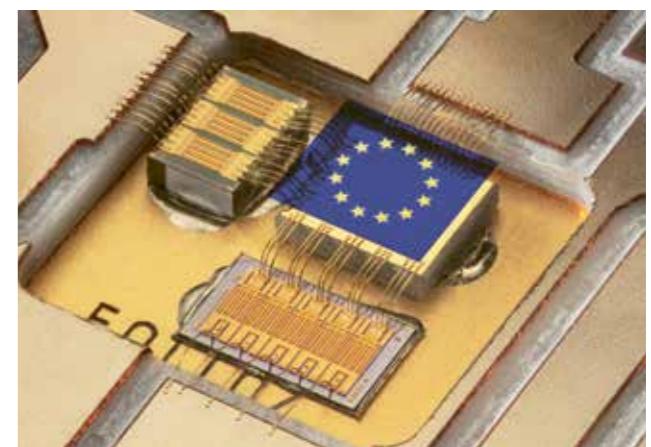
As a contribution to the **EU Chips Act**, a European consortium led by FMD is committed to establishing the most comprehensive and advanced pilot line for "Advanced Heterogeneous System Integration and Advanced Packaging" in the coming years. This pilot line will cover an unprecedented range of device technologies and materials, including not only chip technologies but also system design, connection and assembly techniques as well as characterization, testing, and reliability assessment, thus promoting the innovative capacity of European industry across its entire scope. We will contribute particularly our know-how in indium phosphide (InP)-based heterointegration – more on this topic on page 51 – and in gallium arsenide (GaAs)-based diode lasers. The aim is to establish technology platforms for InP-HBT and GaAs laser chiplets at FBH.

» The FMD-QNC project, which was launched at the end of 2022, addresses fast quantum (Q) and neuromorphic computing (NC) as a prerequisite for new types of computing technologies.

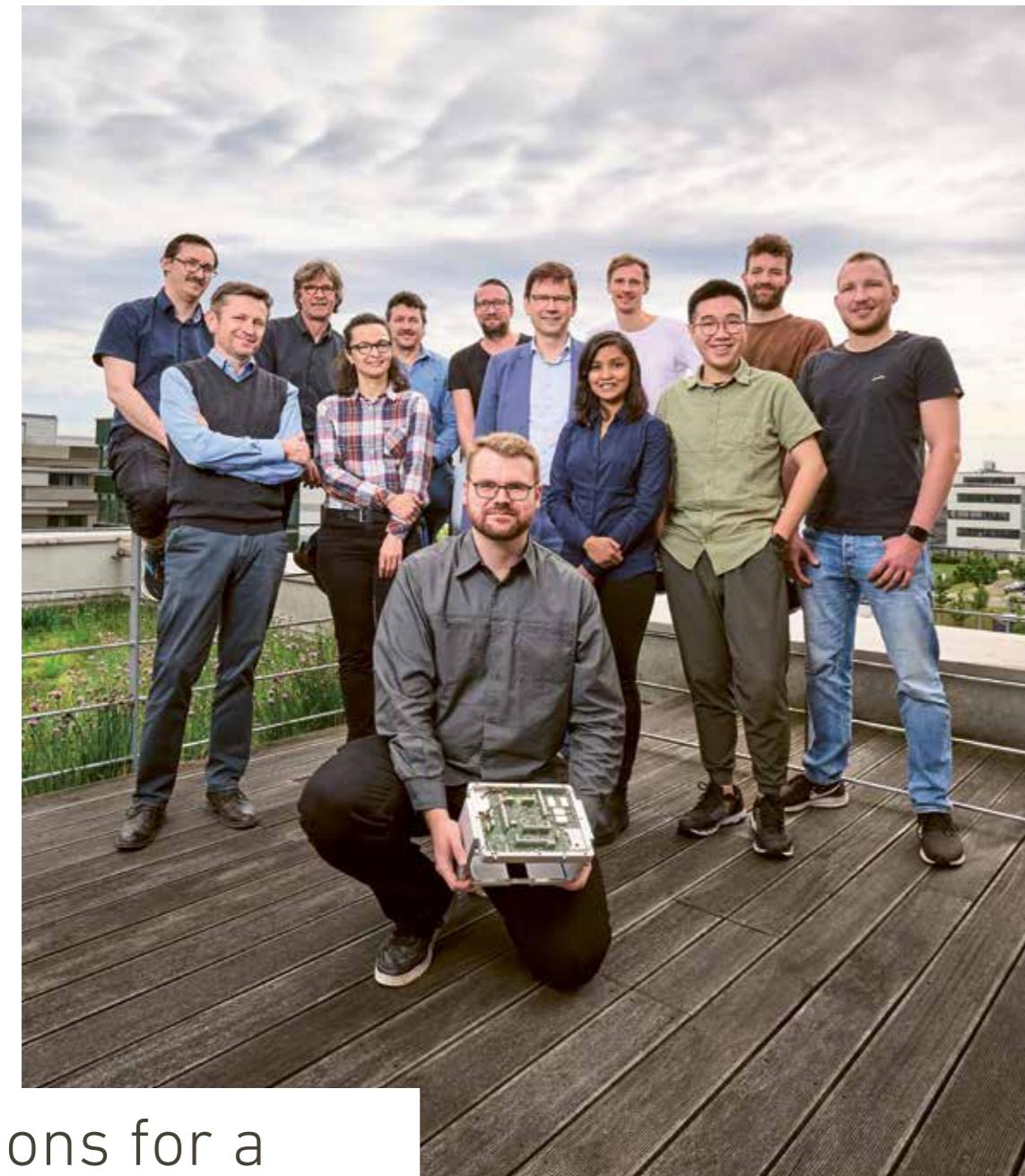
## FMD-Themen im Fokus: grüne Kommunikationstechnologien, neuartige Rechentechnik und Technologiesouveränität

Das FBH ist eines der 13 in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) kooperierenden Institute. Mit insgesamt rund 4.600 Mitarbeiter\*innen bündelt die FMD eine einzigartige Kompetenz- und Infrastrukturvielfalt unter einem Dach. Das macht sie zu einem zentralen Ansprechpartner für alle Fragestellungen rund um die mikro- und nanoelektronische Forschung und Entwicklung in Deutschland und Europa.

Im Rahmen des seit Herbst 2022 vom BMBF geförderten Großprojektes **Green ICT @ FMD** entsteht ein standortübergreifendes Kompetenzzentrum für ressourcenbewusste Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Die beteiligten Institute arbeiten unter anderem an der Öko-Bilanzierung von IKT-Komponenten und -Systemen und stellen geeignete Mess-Umgebungen für Partner in Wirtschaft und Wissenschaft bereit. Wir sind in den Bereichen Leistungskonverter und drahtlose Kommunikation (Digitalisierung, mm-Wellen-Transceiver sowie 140 Gigahertz-Links) beteiligt. Zudem koordinieren wir einen der drei fachlichen Schwerpunkte des Kompetenzzentrums, den Hub „Energiesparende Kommunikationsinfrastrukturen“.



Im vergangenen Jahr haben wir unsere Messplätze für Transceiver bei Frequenzen bis 67 Gigahertz hinsichtlich der Energiebilanzierung erweitert und die Installation eines Outdoor-Links bei 140 Gigahertz vorbereitet. Außerdem haben wir gemeinsam mit den Partnern erstmalig den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer D-Band-Richtfunkverbindung abgeschätzt. Seit Anfang 2024 nehmen wir auch die Öko-Bilanz unseres Indiumphosphid-



## Solutions for a Green ICT.



Colleagues from several teams at FBH are researching and creating solutions to make information and communication technologies more energy-efficient than before. This includes, for example, measurement systems designed to reduce the energy consumption of components in wireless communication and broadband 6G microwave links. Additionally, the environmental impact of the semiconductor process for manufacturing InP mm-wave chips is being assessed. As part of the Green-ICT initiatives within Research Fab Microelectronics Germany, external partners and clients also benefit from these advancements.

Kolleg\*innen mehrerer Teams am FBH erforschen und entwickeln Lösungen, um Informations- und Kommunikationstechnologien energieeffizienter als bisher zu machen. Dazu zählen beispielsweise Messsysteme, die den Energieverbrauch von Komponenten in der drahtlosen Kommunikation und von breitbandigen 6G-Richtfunkverbindungen reduzieren sollen. Außerdem wird die Öko-Bilanz des Halbleiterprozesses zur Herstellung der InP-mm-Wellen-Chips erfasst. Im Rahmen der Green-ICT-Aktivitäten der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland profitieren auch externe Partner und Kunden von diesen Entwicklungen.

Prozesses unter die Lupe: von den Materialen bis hin zum Energieverbrauch während der Fertigung.

Das Ende 2022 gestartete Vorhaben **FMD-QNC** adressiert schnelles Quanten- (Q) und neuromorphes Computing (NC) als Voraussetzung für neuartige Rechentechnologien. Rechenintensive Technologien und Anwendungen, wie etwa die künstliche Intelligenz, bringen klassische Digitalrechner zunehmend an ihre Leistungsgrenzen. Im Vorhaben FMD-QNC bauen die Partner im Verbund eine technologische Infrastruktur für das Quanten-Computing auf – mit Hardware, die Forschende und Unternehmen bei der Entwicklung von maßgeschneiderter Mikroelektronik, skalierbaren Fertigungs- und Integrationsverfahren sowie der anwendungsnahen Erprobung von hochkomplexen Rechentechnologien unterstützt. Um optimale Voraussetzungen dafür zu schaffen, investieren wir am FBH derzeit in einen neuen leistungsstarken Stepper für die Fotolithografie und Anlagen zur optoelektronischen Heterointegration.

Als Beitrag für den **EU Chips Act** plant ein europäisches Konsortium unter der Leitung der FMD, in den kommenden Jahren die umfassendste und fortschrittlichste Pilotlinie für „Advanced Heterogeneous System Integration and Advanced Packaging“ aufzubauen. Diese Pilotlinie umfasst eine noch nie dagewesene Bandbreite an Bauteil-Technologien und Materialien, die neben den Chip-Technologien auch Systemdesign-, Verbindungs- und Montagetechniken sowie Charakterisierung, Test und Bewertung der Zuverlässigkeit beinhaltet – und somit die Innovationsfähigkeit der europäischen Industrie in ihrer gesamten Breite fördert. Wir werden insbesondere unser Know-how bei der Indiumphosphid (InP)-basierten Heterointegration – mehr dazu auf Seite 52 – und bei Galliumarsenid (GaAs)-basierten Diodenlasern einbringen. Ziel ist es, am FBH Technologieplattformen für InP-HBT-Chiplets und GaAs-Laser-Chiplets aufzubauen.

**>> Das Ende 2022 gestartete Vorhaben FMD-QNC adressiert schnelles Quanten- (Q) und neuromorphes Computing (NC) als Voraussetzung für neuartige Rechentechnologien.**



Wolfgang Heinrich (center) was also engaged in intensive discussions on the fringes of the Green ICT event.

Wolfgang Heinrich (Mitte) führte auch am Rande der Green ICT-Veranstaltung intensive Gespräche.

## Structural transition in Lusatia: opportunities for the future through research & development

Since the coal phase-out was decided for 2038, regions like Lusatia have been preparing intensively for the post-lignite era. Research and development in microsensor technology and digitalization are opening up prospects for this structural transition. The BMBF-funded Innovation Campus Electronics and Microsensor Technology (iCampus Cottbus) aims to establish the region as a hub for innovation.

Since 2019, we have been setting up the  $\mu$ -Spectrum application laboratory, where we develop compact Raman sensor systems. This promising technology is currently being tested in a clinical study by Thiem-Research GmbH, a research subsidiary of Carl-Thiem-Klinikum (CTK) in Cottbus. Our novel, spectrometer-free Raman system measures directly on the skin, requires only short measurement times, and is ideal for analyzing selected target substances. Raman spectroscopy can be used to detect

a wide variety of substances by their unique spectral signatures that are as characteristic as fingerprints. The system can, for example, determine the carotenoid content in the skin, which provides insights into an individual's health, indicating potential illnesses or the effectiveness of therapies.

We are also involved in developing a mobile radar system for heart monitoring at home (medical radar). For this, we are developing indium phosphide circuits, which will later be used for terahertz sensing. Additionally, the structural transition project OASYS was launched at the end of December 2023 with 12.5 million euros in funding from the BMBF. This project aims to develop optoelectronic sensors for application-oriented systems in life sciences and smart manufacturing.



Determines the concentration of carotenoids in the skin: real-life test of FBH's mobile, spectrometer-free resonance Raman system.  
Bestimmt den Carotinoid-Gehalt in der Haut: Praxistest des mobil einsetzbaren, spektrometerlosen Resonanz-Raman-Systems des FBH.

» Research and development in microsensor technology and digitalization are opening up prospects for this structural transition.

## Strukturwandel in der Lausitz: Zukunftschancen durch Forschung & Entwicklung

Seit der Kohleausstieg 2038 beschlossene Sache ist, bereiten sich Regionen wie die Lausitz intensiv auf die Zeit nach der Braunkohle vor. Perspektiven für diesen Strukturwandel eröffnen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den Bereichen Mikrosensorik und Digitalisierung. Mit dem vom BMBF geförderten Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik (iCampus Cottbus) soll sich die Region als Innovationsstandort etablieren.

In diesem Rahmen bauen wir seit 2019 das Applikationslabor  $\mu$ -Spektrum auf, in dem wir kompakte Raman-Sensorsysteme entwickeln. Die Praxistauglichkeit der vielversprechenden Technologie wird derzeit von der Thiem-Research GmbH, einer Forschungstochter des Carl-Thiem-Klinikums (CTK) in Cottbus, in einer klinischen Studie erprobt. Unser neuartiges spektrometerloses Raman-System misst direkt an der Haut, benötigt nur kurze Messzeiten und eignet sich für die Analyse ausgewählter Zielsubstanzen. Mithilfe der Raman-Spektroskopie lassen sich verschiedenste Substanzen anhand einer spektralen Signatur nachweisen, die so typisch ist wie ein Fingerabdruck. Damit kann beispielsweise der Gehalt an Carotinoiden in der Haut bestimmt werden. Dies wiederum lässt

Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand von Menschen zu und kann auf Erkrankungen oder die Wirksamkeit von Therapien hinweisen.

Beteiligt sind wir auch an der Entwicklung eines mobilen Radarsystems zum Herz-Monitoring für den Heimbereich (Medizin-Radar). Wir entwickeln dafür Indiumphosphid-Schaltungen, die in einem weiteren Schritt für die Terahertz-Sensorik eingesetzt werden sollen. Ende Dezember 2023 ist zudem das Strukturwandelprojekt OASYS mit 12,5 Millionen Euro Förderung aus dem BMBF an den Start gegangen. Im Projekt sollen optoelektronische Sensoren für anwendungsnahe Systeme für Lebenswissenschaften und intelligente Fertigung entwickelt werden.



## R&D in customer-oriented value chains for diode lasers

The FBH develops and manufactures top-class diode lasers with customized properties. This makes our institute an indispensable part of the supply chains of many partners from research and industry. The more than 20-year success story of the spin-off eagleyard Photonics is just one example. While the company is now part of TOPTICA Photonics AG, the laser chips still come from FBH.

## F&E in kundenorientierten Wertschöpfungsketten bei Diodenlasern

Das FBH entwickelt und fertigt Diodenlaser mit maßgeschneiderten Eigenschaften der Spitzenklasse. Das macht unser Institut zu einem unverzichtbaren Bestandteil von Lieferketten vieler Partner aus Forschung und Industrie. Dazu zählt auch die mehr als 20-jährige Erfolgsgeschichte der Ausgründung eagleyard Photonics. Das Unternehmen gehört inzwischen zur TOPTICA Photonics AG, die Laserchips kommen aber nach wie vor aus dem FBH.

# Tailor-made diode lasers: from industrial production to generating energy through laser fusion

## Additive manufacturing made in Berlin

In our projects, we cooperate with research and industry partners to enable new applications or improve existing ones. In this process, the FBH is moving increasingly towards system solutions. In the SAMBA project, for example, we are developing and implementing an efficient and direct laser light source for additive manufacturing. The system aims to improve light-weight construction, which is used, for example, in the production of side walls for high-speed trains. We develop and manufacture the compact laser head with integrated direct diode laser modules in the kilowatt class. The Berlin-based partner companies Photon Laser Manufacturing GmbH and SKDK GmbH ensure smooth process control and integrate the system onto a robot arm.



↑ Single stacking element from the BRISCL project, delivering 62 watts of CW output power with excellent efficiency.

Einzelnes Stack-Element aus dem BRISCL-Projekt, das 62 Watt CW-Ausgangsleistung mit exzellentem Wirkungsgrad liefert.

We have already successfully presented this project several times together with our industry partners: to experts at our booth at the Laser World of Photonics 2023 and to Franziska Giffey, Senator for Economic Affairs Berlin, at the Additive Manufacturing trade fair, where SAMBA was introduced as part of

the AMBER "Additive Manufacturing Berlin Brandenburg" innovation network. A second meeting with Franziska Giffey followed during her visit to Photon's production facility together with Brandenburg's Minister of Economic Affairs Jörg Steinbach.

## Opening up emerging applications with high-performance pump laser sources

In the HOTSTACK Pro FIT project, we are working with our partners TRUMPF, Finetech, and Laytec to develop diode laser stacks with a high duty cycle and increased power. Used as pump sources, these stacks are key components for a new generation of laser applications based on pulsed solid-state lasers of the highest energy class. Their ultrashort pulses deliver energies up to the petawatt range and are utilized to generate a wide variety of beam shapes. This enables applications in material processing, spectroscopy, imaging, and even laser fusion – as their performance cannot be obtained with any other technology.

The high pulse energies of this new type of pump source can be achieved by stacking optimized diode lasers on top of each other. Our scientists are aiming to significantly increase their performance through technological improvements of both the diode lasers and the assembly. Manufacturing costs are to be reduced at the same time.

## Innovative diode laser technologies – foundation with decisive adjusting screws

Such innovations are based on FBH's constantly evolving diode laser technologies. New beam combinations, optical resonators, diode laser designs, and optimized technologies enable ever higher output powers with simultaneously high efficiency. The diode lasers can therefore be used not only as pump sources, but increasingly directly. In 2023, we realized 915 nm broad area lasers with a 1200 µm aperture at the institute, which deliver an output power of 93 watts per emitter with 70% efficiency in quasi-continuous mode (QCW). Also in continuous wave (CW) operation, the diode lasers developed in the BMBF-funded Eurostars project BRISCL achieved top values with 62 watts peak power and 62 % efficiency on a compact carrier. The efficiency can be specifically adapted to the respective application by varying the stripe width.



## Technology for next-generation industrial laser systems.

HOTSTACK will scale the performance of diode laser pumps to meet the needs of high-energy pulsed laser systems for novel applications, from femtosecond lasers to secondary source generation to laser fusion. In this project, we are developing advanced pump sources based on stacked arrays of diode lasers yielding the highest output powers and efficiencies. To be able to test them, we acquired the world's first 1000 A, 1000 Hz pulsed current supply, which can be seen in the center of the image.

Im Projekt HOTSTACK skalieren wir die Leistungen von Pump-laserquellen so stark, dass sie die Anforderungen hochenergetischer gepulster Lasersysteme erfüllen, wie sie für neuartige Anwendungen notwendig sind. Die Applikationen reichen von Femtosekundenlasern über Sekundärstrahlquellen bis hin zur Laserfusion. Wir entwickeln die dafür benötigten Pumpquellen, die wir zu Stacks mit höchsten Ausgangsleistungen und Effizienzen stapeln. Um diese Laser testen zu können, nutzen wir die weltweit erste gepulste Stromversorgung mit 1000 A und 1000 Hz, die in der Bildmitte zu sehen ist.



## Maßgeschneiderte Diodenlaser: von der industriellen Fertigung bis zur Energieerzeugung durch Laserfusion



↑ Laser head with integrated direct diode laser modules before mounting on the robot arm.  
Laserkopf mit integrierten Direkt-Diodenlasermodulen vor der Montage auf den Roboterarm.

### Additive Fertigung made in Berlin

In unseren Projekten kooperieren wir mit Forschungs- und Industriepartnern, um neuartige Anwendungen zu ermöglichen oder bestehende zu verbessern. Dabei geht das FBH immer weiter in Richtung Systemlösung. So entwickeln und realisieren wir im Projekt SAMBA eine effiziente und direkte Laserlichtquelle für die Additive Fertigung. Das System zielt auf eine verbesserte Leichtbaufertigung, die unter anderem bei der Produktion von Seitenwänden für Hochgeschwindigkeitszüge eingesetzt wird. Wir entwickeln und fertigen den kompakten Laserkopf und die darin integrierten Direkt-Diodenlasermodule der Kilowattklasse. Die Berliner Partnerunternehmen Photon Laser Manufacturing GmbH und SKDK GmbH sorgen für die reibungslose Prozesssteuerung und integrieren das System auf einen Roboterarm.

Dieses Projekt haben wir gemeinsam mit unseren Industriepartnern bereits mehrfach erfolgreich präsentiert: Der Fachwelt am Messestand auf der Laser World of Photonics 2023 und Berlins Wirtschaftssenatorin Franziska Giffey im Umfeld

der Additive Manufacturing Messe. Dort präsentierte sich SAMBA als Teil des Innovationsnetzwerks AMBER "Additive Manufacturing Berlin Brandenburg". Ein zweites Treffen mit Franziska Giffey fand bei ihrem Besuch der Photon-Produktionsstätte zusammen mit Brandenburgs Wirtschaftsminister Jörg Steinbach statt.

### Aufkommende Anwendungen mit leistungsstarken Pumpplaserquellen erschließen

Im Pro FIT-Projekt HOTSTACK entwickeln wir gemeinsam mit den Partnern TRUMPF, Finetech und Laytec Diodenlaserstacks mit hohem Tastverhältnis und gesteigerter Leistung. Diese werden als Pumpquellen eingesetzt und sind Schlüsselkomponenten für eine neue Generation von Laseranwendungen, die auf gepulsten Festkörperlasern der höchsten Energieklasse basieren. Deren ultrakurze Pulse liefern Energien bis in den Petawattbereich und werden genutzt, um die verschiedensten Strahlungsformen zu erzeugen. Dadurch ermöglichen sie Anwendungen in der Materialbearbeitung, der

Spektroskopie und der Bildgebung bis hin zur Laserfusion – denn ihre Leistungen können mit keiner anderen Technik erreicht werden.

Die hohen Pulsennergien der neuartigen Pumpquellen lassen sich durch übereinander gestapelte, optimierte Diodenlaser erzielen. Deren Leistungen wollen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler durch technologische Verbesserungen sowohl der Diodenlaser als auch der Montage erheblich steigern. Die Herstellungskosten sollen gleichzeitig sinken.

### Innovative Diodenlaser-Technologien – Fundament mit den entscheidenden Stellschrauben

Die Basis für derartige Innovationen liefern die stetig weiterentwickelten Diodenlaser-Technologien des FBH. Durch neuartige Strahlkombinationen, optische Resonatoren, Diodenlaser-Designs und optimierte Technologien lassen sich immer höhere Ausgangsleistungen bei zugleich hoher Effizienz erzielen. Die Diodenlaser können somit nicht nur als Pumpquellen, sondern zunehmend direkt eingesetzt werden. 2023 haben wir am Institut 915 nm Breitstreifenlaser mit einer 1200 µm breiten Apertur realisiert, die im quasi-kontinuierlichen Betrieb (QCW) 93 Watt Ausgangsleistung pro Emitter mit 70 % Wirkungsgrad liefern. Ebenfalls im kontinuierlichen Betrieb (CW) erzielten die im BMBF-geförderten Eurostars-Projekt BRISCL entwickelten Diodenlaser Bestwerte mit einer Peak-Leistung von 62 Watt und 62 % Wirkungsgrad auf einem kompakten Träger, deren Leistung wir stetig weiter steigern. Der Wirkungsgrad lässt sich durch Variation der Streifenbreite gezielt auf die jeweilige Anwendung einstellen.

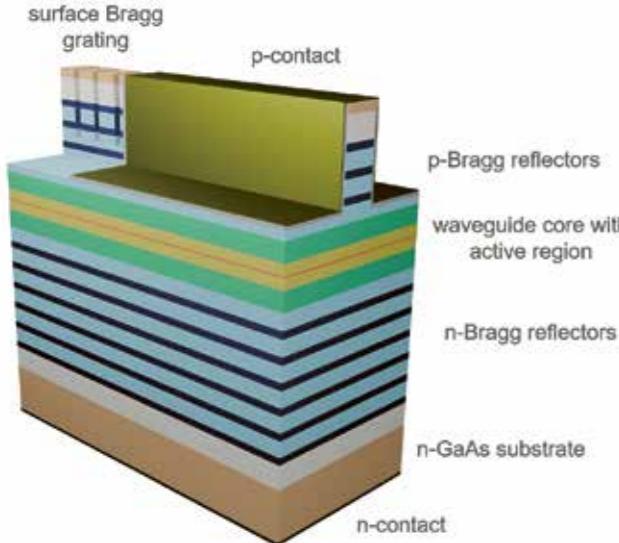


❶ High-performance diode laser stack developed within the HOTSTACK project: promising pump sources for solid-state lasers designed to deliver ultrashort pulses with energies up to the petawatt range.  
Leistungsstarker Diodenlaserstack aus dem HOTSTACK-Projekt: vielversprechende Pumpquellen für Festkörperlaser, die ultrakurze Pulse mit Energien bis in den Petawattbereich liefern sollen.

❷ Presentation of the SAMBA laser system in use at partner Photon Laser Manufacturing GmbH. From left to right: Franziska Giffey (Senator for Economic Affairs), Ulrich Scherrer (Photon), Jörg Steinbach (Minister of Economic Affairs Brandenburg), Paul Crump (FBH), and Holger Alder (Photon). Präsentation des SAMBA-Lasersystems im Einsatz beim Partner Photon Laser Manufacturing GmbH. V.l.n.r.: Franziska Giffey (Wirtschaftssenatorin), Ulrich Scherrer (Photon), Jörg Steinbach (Wirtschaftsminister Brandenburg), Paul Crump (FBH) und Holger Alder (Photon).



# FBH developments for quantum technologies: from fundamental research to real-world applications



Structure of the DBR lasers developed in the VOMBAT project, in which laser light at 775 nm is converted into entangled photons at 1550 nm.

Aufbau der im Projekt VOMBAT entwickelten DBR-Laser, in denen Laserlicht bei 775 nm in miteinander verschränkte Photonen bei 1550 nm umgewandelt wird.

R&D activities in the Integrated Quantum Technology research area at the Ferdinand-Braun-Institut aim to transfer proof-of-concept demonstrators of quantum technology from the laboratory into industry-ready solutions. The spectrum ranges from novel technology concepts to components and systems that are already successfully in operation. We cooperate with Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin) in four Joint Labs, bridging the gap between basic and application-oriented research.

Two of these labs focus on **atom-based quantum technologies** and **quantum sensing**. Since 2008, we have been developing narrowband and ultra-narrowband diode laser modules, spectroscopy, and distribution modules, particularly for use in space, as part of the first Joint Lab. These modules have repeatedly demonstrated their performance in practical applications – most recently on board the MAIUS-2 research rocket. Another Joint Lab is developing the next generation of chip-scale quantum sensors based on high-precision spectroscopy of atomic or molecular ensembles.

The other two Joint Labs are working on **integrated photonic devices for quantum communication and information processing** using precise control of light. They are researching novel concepts for solid-state quantum emitters that are suitable for photonic integration. These include, for example, color centers in diamond or silicon carbide. The scientists produce nano- and microstructures that guide, trap, and manipulate light on the nano- and microscale. The long-term aim is to develop compact on-chip modules for quantum communication and computing.

## Current development examples from our labs and departments

R&D activities aimed at applications in quantum technologies are being carried out in the research area bearing the same name as well as in other labs and departments.

The Laser Modules Lab, for example, manufactures hybrid integrated, miniaturized quantum light modules as newly developed components for **hyperspectral imaging** in the mid-infrared and **quantum OCT sensors** (OCT – optical coherence tomography). Our quantum light modules are based on entangled photon pairs that are brought to interference in a non-linear interferometer – and make the mid-infrared (mid-IR) spectral range accessible this way. Measurements are performed exclusively in the near infrared (NIR). Neither detectors nor radiation sources in the mid-IR are required. In the BMBF-funded QEED project, we are integrating novel laser diodes and micro-optical elements together with a non-linear optical crystal into the smallest possible space for the quantum light modules.

Single and entangled photons are the fundamental building blocks for **quantum communication**, ensuring that our communication can be secured against eavesdropping attacks. To utilize existing infrastructure and bridge long distances, sources must operate in low-loss telecommunications bands, such as the Telekom C-band at wavelengths around 1550 nm. For data transmission to multiple receivers, we are currently developing broadband sources that transmit keys via wavelength demultiplexing. To meet these technical requirements, we are developing a monolithically integrated source for entangled photon pairs based on electrically pumped Bragg reflection waveguides in the BMBF project VOMBAT. In this system, laser light at



## Entangled photon pairs for rapid cancer diagnostics.

In the BMBF-funded QEED project, partners from research and industry are developing an innovative, spectrally resolved imaging method based on entangled photon pairs. This is expected to detect and treat cancer more quickly in the future. We are developing the required high-power diode lasers, which we are integrating into a new type of technology platform for quantum light modules. Our Prototype Engineering Lab then assembles these modules together with the project partners' components into the final QEED system.

Im BMBF geförderten Projekt QEED entwickeln Partner aus Forschung und Industrie ein innovatives, spektral aufgelöstes Bildgebungsverfahren, das auf verschränkten Photonenpaaren beruht. Damit soll Krebs künftig schneller erkannt und bekämpft werden können. Wir entwickeln die benötigten Hochleistungsdiodenlaser, die wir in eine neuartige Technologieplattform zu Quantenlichtmodulen integrieren. Unser EntwicklungsZentrum montiert diese Module dann gemeinsam mit den Komponenten der Projektpartner in das fertige QEED-System.





High-precision ceramic 3D printing at FBH: We used this lithography-based printer to realize the micro-optical bench of the miniaturized optical frequency reference.

3D-Druck von Keramik am FBH mit hoher Präzision: Mit diesem lithografiebasierten Drucker haben wir die mikrooptische Bank der miniaturisierten optischen Frequenzreferenz gefertigt.

775 nm is generated by electrical pumping in the same waveguide, which is then converted into entangled photon pairs at 1550 nm through a nonlinear process.

The Joint Lab Integrated Quantum Sensors has used **additively manufactured ceramics** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) for the first time to develop compact, robust electro-optical systems and miniaturized physics packages for quantum technology applications. Specifically, a **miniaturized optical frequency reference** based on the frequency modulation spectroscopy of the Rubidium D2 transition has been realized. Optical components were micro-integrated on a printed optical bench with a housing made of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (<https://arxiv.org/abs/2402.10274>). With a volume of 6 mL and a mass of 15 g, the realized frequency reference is significantly more compact and lighter than conventional laboratory setups. The demonstrated frequency instability is comparable and suitable for applications in optical calibration, synchronization, and as a reference for experiments with cold atoms. The compact design and fiber-coupled optics make it easy to integrate this frequency reference into larger systems, such as sensors based on atomic gases and optically pumped magnetometers. The use of additive manufacturing for ceramics enables

great design freedom, agile development cycles, and efficient prototype and small series production in R&D environments.

In the Joint Lab Diamond Nanophotonics, a multipixel magnetometer for **medical diagnostics** has been developed. It lays the groundwork for compact, mobile magnetic field cameras based on a much-simplified measurement principle. The basis is a newly developed optical quantum sensor with fiber optic coupling, based on nitrogen-vacancy centers in diamond. In the diamond chip, green pump and infrared laser beams intersect – each intersection point defines a camera pixel. Depending on the applied magnetic field, more or less infrared light is absorbed in the diamond, which can then be detected. To measure a magnetic field spatially, the sample is simply placed on the diamond chip. The compact magnetic field camera operates at room temperature and can be integrated into a portable device. In the future, it could also be used to further develop batteries for the green mobility transition.

## FBH-Entwicklungen für die Quantentechnologien: von den Grundlagen bis zum praktischen Einsatz

Die F&E-Aktivitäten im Forschungsbereich Integrierte Quantentechnologie am Ferdinand-Braun-Institut zielen darauf, Proof-of-Concept-Demonstratoren der Quantentechnologie aus dem Labor in industrietaugliche Lösungen zu überführen. Das Spektrum reicht von neuartigen Technologiekonzepten bis hin zu Komponenten und Systemen, die bereits erfolgreich im Einsatz sind. Wir kooperieren dazu im Rahmen von vier Joint Labs mit der Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin) und schlagen so die Brücke zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung.

Zwei dieser Labs setzen ihren Fokus auf **atombasierte Quantentechnologien und die Quantensensorik**. Bereits seit 2008 entwickeln wir im Rahmen des ersten Joint Labs schmalbandige und ultra-schmalbandige Diodenlasermodule, Spektroskopie- und Verteilermodule insbesondere für den Einsatz im Weltraum. Diese Module haben ihre Leistungsfähigkeit mehrfach im praktischen Einsatz unter Beweis gestellt – zuletzt an Bord der Forschungsrakete MAIUS-2. Ein weiteres Joint Lab entwickelt die nächste Generation von Quantensensoren im Chipmaßstab, die auf der hochpräzisen Spektroskopie atomarer oder molekularer Ensembles beruhen.

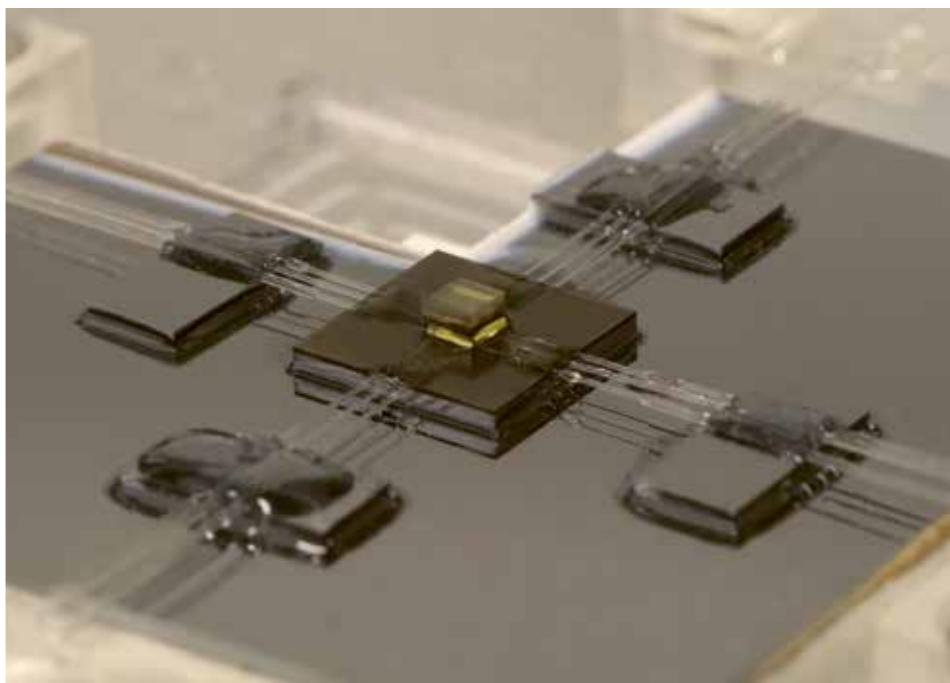
Die beiden anderen Joint Labs beschäftigen sich mit **integrierten photonischen Bauelementen für die Quantenkomunikation und -informationsverarbeitung** und nutzen die präzise Kontrolle von Licht. Sie erforschen neuartige Konzepte für festkörperbasierte Quantenemitter, die sich für ein-

photonische Integration eignen. Dazu zählen beispielsweise Farbzentren in Diamant oder Siliziumkarbid. Die Wissenschaftler\*innen stellen Nano- und Mikrostrukturen her, die Licht auf der Nano- und Mikroskala leiten, fangen und manipulieren. Langfristig sollen kompakte On-Chip-Module für Quantenkommunikation und -computing entwickelt werden.

### Aktuelle Entwicklungsbeispiele aus unseren Labs und Departments

F&E-Aktivitäten für Anwendungen in den Quantentechnologien finden sowohl im gleichnamigen Forschungsbereich als auch in weiteren Labs und Departments statt.

So kommen aus dem Laser Modules Lab hybrid integrierte, miniaturisierte Quantenlicht-Module als neuentwickelte Komponenten für die **hyperspektrale Bildgebung** im mittleren Infrarot und die **Quanten-OCT-Sensorik** (OCT – Optische Kohärenz-Tomografie). Unsere Quantenlicht-Module basieren auf verschränkten Photonenpaaren, die in einem nichtlinearen Interferometer zur Interferenz gebracht werden – und auf diese Weise den mittleren Infrarot (mid-IR)-Spektralbereich zugänglich machen. Dabei wird ausschließlich im nahen Infrarot (NIR) gemessen. Weder Detektoren noch Strahlungsquellen im mid-IR werden benötigt. Für die Quantenlicht-Module integrieren wir im BMBF-geförderten QEED-Projekt neuartige Laserdioden und mikrooptische Elemente zusammen mit einem nichtlinearen optischen Kristall auf kleinstem Raum.



The quantum sensor with fiber optic coupling developed in the Joint Lab – the diamond chip is located in the center.

Der im Joint Lab entwickelte Quantensensor mit Glasfaserkopplung – im Zentrum befindet sich der Diamantchip.

Einzelne und verschränkte Photonen sind die Grundbausteine für die **Quantenkommunikation**. Sie sorgen dafür, dass unsere Kommunikation gegen Abhörangriffe gesichert werden kann. Um die existierende Infrastruktur weiter nutzen zu können und um große Entferungen zu überbrücken, müssen die Quellen in verlustarmen Telekommunikationsbändern arbeiten. Dazu zählt beispielsweise das Telekom-C-Band bei Wellenlängen um 1550 nm. Für die Datenübertragung an mehrere Empfänger entwickeln wir derzeit breitbandige Quellen, die den Schlüssel via Wellenlängen-Demultiplexing übertragen. Um diese technischen Anforderungen zu erfüllen, entwickeln wir im BMBF-Projekt VOMBAT eine monolithisch-integrierte Quelle für verschränkte Photonenpaare auf Basis von elektrisch gepumpten Bragg-Reflexionswellenleitern. Hierbei wird in demselben Wellenleiter Laserlicht bei 775 nm durch elektrisches Pumpen erzeugt, welches dann durch einen nichtlinearen Prozess in verschränkte Photonenpaare bei 1550 nm umgewandelt wird.

Das Joint Lab Integrierte Quantensensoren hat erstmalig **additiv gefertigte Keramik** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) verwendet, um kompakte, robuste elektro-optische Systeme und miniaturisierte Physikpakete für Anwendungen in der Quantentechnologie zu entwickeln. Konkret wurde eine **miniaturisierte optische Frequenzreferenz** realisiert, die auf der Frequenzmodulations-Spektroskopie des Rubidium D2-Übergangs basiert. Dabei wurden optische Komponenten auf eine gedruckte optische Bank mit Gehäuse aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mikrointegriert (<https://arxiv.org/abs/2402.10274>). Mit einem Volumen von 6 mL und einer Masse von 15 g ist die realisierte Frequenzreferenz deutlich kompakter und leichter als herkömmliche Laboraufbauten. Die demonstrierte Frequenz-

instabilität ist vergleichbar und eignet sich für Anwendungen in optischer Kalibration, Synchronisation und auch als Referenz für Experimente mit kalten Atomen. Durch den kompakten Aufbau und die fasergekoppelte Optik lässt sich diese Frequenzreferenz einfach in übergeordnete Systeme integrieren, wie etwa Sensoren auf Basis atomarer Gase sowie optisch gepumpte Magnetometer. Der Einsatz additiver Fertigung für Keramik ermöglicht eine große Designfreiheit, agile Entwicklungszyklen und eine effiziente Fertigung von Prototypen und Kleinserien in F&E-Umgebungen.

Im Joint Lab Diamond Nanophotonics wurde ein Multipixel-Magnetometer für die **medizinische Diagnostik** entwickelt. Es schafft die Voraussetzungen für kompakte, mobil einsetzbare Magnetfeldkameras, die auf einem deutlich vereinfachten Messprinzip basieren. Die Basis dafür liefert ein neu entwickelter optischer Quantensensor mit Glasfaserkopplung, der auf Stickstoff-Fehlstellen in Diamant basiert. In dem Diamantchip kreuzen sich grüne Pump- und infrarote Laserstrahlen – jeder Kreuzungspunkt definiert dabei ein Kamerapixel. Je nach angelegtem Magnetfeld wird mehr oder weniger infrarotes Licht im Diamanten aufgenommen (absorbiert), was wiederum nachgewiesen (detektiert) werden kann. Um also ein Magnetfeld ortsaufgelöst zu vermessen, wird die Probe einfach auf den Diamantchip gelegt. Die kompakte Magnetfeldkamera arbeitet bei Raumtemperatur und lässt sich in ein tragbares Gerät integrieren. Sie könnte künftig auch genutzt werden, um Batterien für die grüne Mobilitätswende weiterzuentwickeln.



Highly specialized diode laser modules are being developed in the QEED project for quantum-based early cancer diagnostics. Hochspezialisierte Dioden-lasermodule entstehen im Projekt QEED für die quantengestützte Frühdiagnostik von Krebs.



The intuitive robotic system 'Microbot' allows ultra-precision assembly of complex photonic modules containing lasers and lenses. Mit der intuitiv bedienbaren robotischen Anlage „Microbot“ lassen sich komplexe photonische Module mit Lasern und Linsen mit höchster Genauigkeit montieren.

## Robotics, virtual reality, and AI – advanced microintegration technology at FBH

With our globally unique hybrid microintegration technology, we realize highly complex, miniaturized photonic and laser-based modules. These are as robust as they are powerful and are used in quantum technology applications, some even in space. In assembly, we increasingly rely on partial automation by utilizing collaborative robots. Concurrently, we optimize manufacturing with the help of artificial intelligence. Until now, the modules have been primarily assembled "by hand" by experts with years of training in research labs. To enable industrial manufacturing in the future, we are currently developing industrial-grade manufacturing technology at FBH in collaboration with Robo Technology GmbH. In 2023, our industrial partner was awarded the Stäubli Robotics Award for particularly innovative robotic solutions, a recognition regularly given to distribution partners by the Swiss company.

The robotic approach allows us maximum operational flexibility. In the future, both individual pieces for research operations and pilot and smallest series can be assembled quickly and alternately without any reconfiguration. The concept is based on an "Augmented Operator" approach. Here, the robot takes on tasks

in which it surpasses human operators, such as the highly precise guidance of assembly tools. Interaction between the robotic environment and humans is intuitive, thanks to Augmented (AR) and Virtual Reality (VR) – through gestures, voice, and movements.

Similar to tele-surgery in medicine, a digital twin is central to this process, providing visualization of the system using AR/VR methods. This enables operators to control up to four independent, ultra-high-resolution robots that adjust components, as well as up to four cleanroom-compatible 6-axis industrial robots that will soon be added to the system. The latter take over tasks previously performed by humans, such as operating digital stereomicroscopes, precisely applying and UV-curing adhesives, and coupling out laser radiation from the module during assembly for alignment and quality control. The operator and digital twin interact intuitively with each other. The robot movements planned in the digital twin are projected into the real environment using AR. This allows the workflow to be planned in detail and checked in the real environment before execution. In the future, modules will be able to be assembled reproducibly, reliably, and also much faster.

## Robotik, virtuelle Realität und KI – weiterentwickelte Mikointegrations-Technologie am FBH



ⓘ The micro-assembly of photonic modules can be practiced using the digital twin.

Am digitalen Zwilling lässt sich die Mikromontage photonischer Module trainieren.

Mit unserer weltweit einzigartigen hybriden Mikointegrations-technologie realisieren wir hochkomplexe, miniaturisierte photonische und laserbasierte Module. Diese sind ebenso robust wie leistungsfähig und werden unter anderem in quantentechnologischen Anwendungen, teils auch im Weltraum, eingesetzt. Bei der Montage setzen wir zunehmend auf eine Teilmontage, indem wir kollaborative Roboter nutzen. Parallel optimieren wir die Fertigung mithilfe von künstlicher Intelligenz. Bislang wurden die Module im Wesentlichen im Forschungslabor „in Handarbeit“ von Expertinnen und Experten nach jahrelanger Ausbildung zusammengebaut. Um künftig eine industrielle Fertigung zu ermöglichen, entwickeln wir am FBH gemeinsam mit der Robo Technology GmbH derzeit eine industrietaugliche Fertigungstechnologie. Dafür wurde unser Industriepartner 2023 mit dem Stäubli Robotics Award für besonders innovative robotische Lösungen ausgezeichnet, den die Schweizer Firma regelmäßig an Vertriebspartner vergibt.

Der robotische Ansatz erlaubt uns maximale Flexibilität im Betrieb. So können in Zukunft sowohl Einzelstücke für den Forschungsbetrieb als auch Pilot- und Kleinstserien im raschen Wechsel ohne Umbauten montiert werden. Das Konzept basiert auf einem „Augmented Operator“-Ansatz. Hierbei übernimmt der Roboter Aufgaben, in denen er menschlichen Anlagenbediener\*innen überlegen ist, wie etwa beim hochgenauen Führen der Montagewerkzeuge. Die Interaktion zwischen robotischer Umgebung und Mensch ist dank Augmented (AR) und Virtual Reality (VR) intuitiv – mittels Gesten, Sprache und Bewegungen.



ⓘ If you want to find out more about the robotic system, you can watch this video, which shows the capabilities of the digital twin and the robotic unit.

Wer mehr über das Robotik-System erfahren will – hier geht es zum Video, das die Leistungsfähigkeit von digitalem Zwilling und Anlage zeigt.

## Reliably moving through space: product assurance at FBH

Reproducibility and reliability are crucial characteristics of components used in space missions. The lifetime of a satellite, for example, may be up to 15 years. During this period, all components are expected to function flawlessly. This requirement is met by our components that have been in operation for many years, such as our pump lasers in Tesat Spacecom's laser communication terminals.

Comprehensive product assurance (PA) introduced at an early stage makes the development process more efficient and the success of a satellite or a mission in space more likely. We are therefore currently expanding our product assurance activities in space projects. Depending on the targeted technology readiness level (TRL) and the project goals, we adapt these to the respective project level. If the TRL is low, we reduce the PA to the necessary level in order to maintain sufficient creative freedom in the development process. With a high TRL, on the other hand, we carry out the complete product assurance and transfer the tested and ready-to-use components or modules to the customer.

">>> We are involved in several missions in collaboration with established space industry players – at both national and international level.

Our product lifecycle management (PLM) is based on established norms and standards (ECSS, NASA, MIL), but tailored to the specifics of the hardware to be developed and/or supplied. This ranges from validating the design approach to securing supply chains for components – the latter is becoming increasingly important in view of geopolitical challenges.



ⓘ On board TerraSAR-X and TanDEM-X are FBH's reliable pump laser modules. The satellite twins collect data that is sent to earth via laser communication and analyzed for digital elevation models. For the laser modules on TerraSAR-X, the FBH has carried out a complete qualification according to ESA standards.

Mit an Bord von TerraSAR-X und TanDEM-X sind die zuverlässigen Pumpplasermodule aus dem FBH. Die Satellitenzwillinge erfassen Daten, die per Laserkommunikation zur Erde geschickt und für digitale Höhenmodelle ausgewertet werden. Für die Lasermodule auf TerraSAR-X hat das FBH eine vollständige Qualifikation nach ESA-Standards durchgeführt.

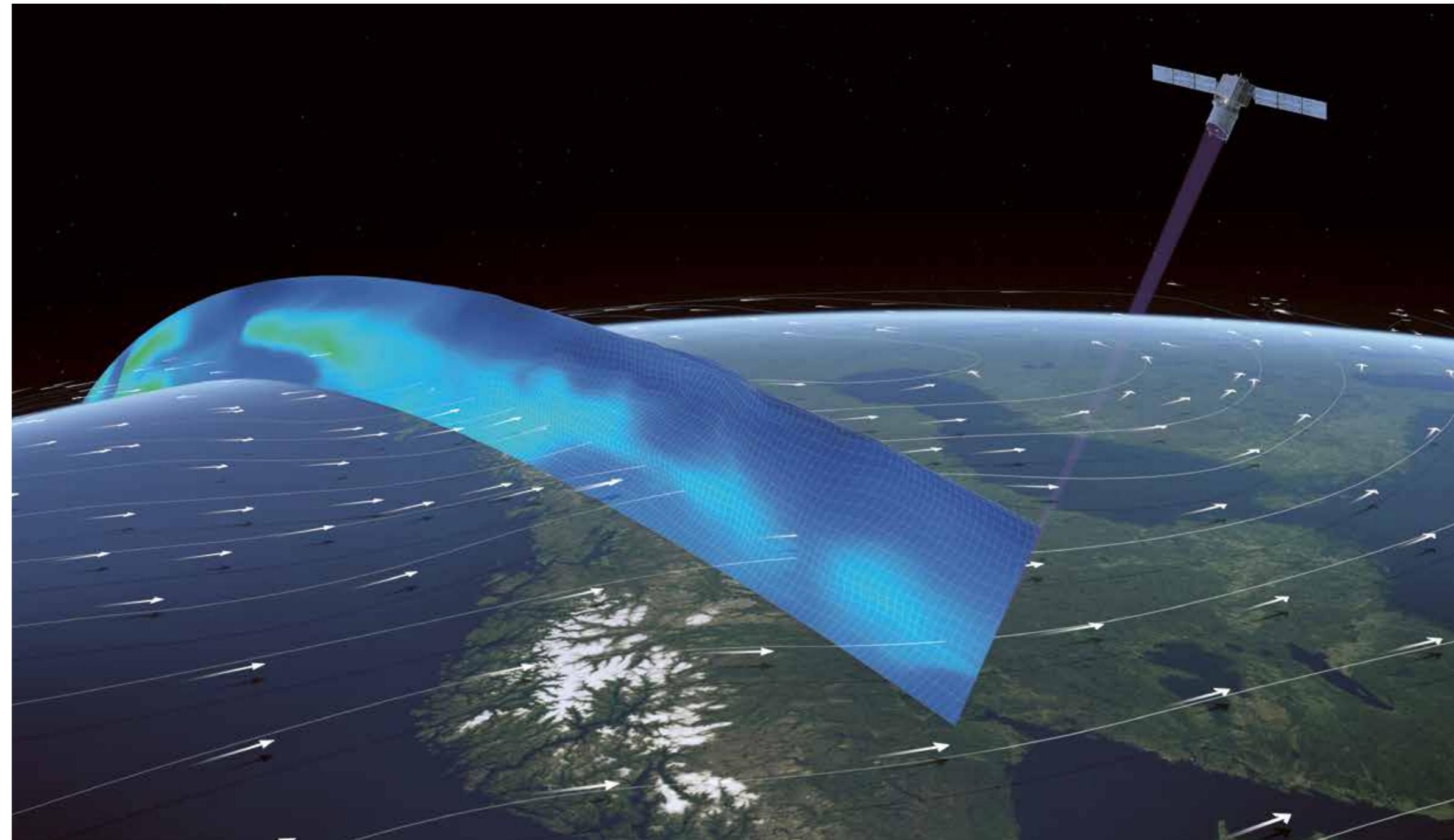
We are involved in several missions in collaboration with established space industry players – at both national and international level. Regular exchange with our industry partners enables us to further expand our PA expertise. As the focus here is on our own developments, we also avoid the risk of direct competition with these partners. At the same time, we are implementing a digital PLM platform in the Siemens Teamcenter, which allows us to network and track complex processes and manage the related data. Thus, requirements management, design and engineering, production, verification, and validation are all handled in one environment.

## Zuverlässig unterwegs im Weltraum: Produktsicherung am FBH

Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit spielen bei Komponenten für Weltraummissionen eine zentrale Rolle. Die Lebensdauer eines Satelliten beispielsweise beträgt bis zu 15 Jahre. Während dieses Zeitraums müssen sämtliche Komponenten einwandfrei funktionieren. Diese Anforderung erfüllen unsere langjährig in Betrieb befindlichen Komponenten, wie etwa unsere Pumplaser in den Laserkommunikations-Terminals von Tesat Spacecom.

Je früher eine umfassende Produktsicherung (engl. Product Assurance – PA) eingeführt wird, desto effizienter ist der Entwicklungsprozess und desto wahrscheinlicher der Erfolg eines Satelliten oder einer Mission im Weltraum. Daher bauen wir unsere Produktsicherung in Raumfahrtprojekten zurzeit weiter aus. Je nach angestrebtem Technologiereifegrad (TRL) und Projektzielen passen wir diese auf die jeweilige Projekt Ebene an. Bei niedrigem TRL reduzieren wir die PA auf das erforderliche Maß, um ausreichend kreativen Freiraum im Entwicklungsprozess zu erhalten. Bei hohem TRL hingegen führen wir die komplette Produktsicherung durch und übergeben die geprüften und einsatzfähigen Komponenten oder Module an den Kunden.

Unser Produktlebenszyklus-Management (engl. Product Lifecycle Management – PLM) basiert auf etablierten Normen und Standards (ECSS, NASA, MIL), ist jedoch auf die Besonderheiten der zu entwickelnden und/oder zu liefernden Hardware zugeschnitten. Dies reicht von der Validierung des Entwurfsansatzes bis zur Sicherung der Lieferketten von Komponenten – letzteres gewinnt angesichts geopolitischer Herausforderungen an Bedeutung.



Wir sind an mehreren Missionen in Zusammenarbeit mit etablierten Akteuren der Raumfahrtbranche beteiligt – auf nationaler wie internationaler Ebene. Unser PA-Know-how bauen wir im regelmäßigen Austausch mit unseren Industriepartnern weiter aus. Da hierbei unsere eigenen Entwicklungen im Fokus stehen, vermeiden wir zugleich das Risiko eines direkten Wettbewerbs mit diesen Partnern. Parallel implementieren wir eine digitale PLM-Plattform im Siemens-Teamcenter, die es uns ermöglicht, komplexe Prozesse und deren Datenmanagement miteinander zu vernetzen und zu verfolgen. Anforderungsmanagement, Design, Engineering und Fertigung bis hin zur Verifikation und Validierung werden in einer Umgebung verwaltet.

↑ FBH laser modules were also on board the AEOLUS weather satellite and functioned smoothly as planned during the five-year mission.

FBH-Lasermodule befanden sich auch an Bord des Wettersatelliten AEOLUS und haben während der 5-jährigen Missionsdauer wie geplant reibungslos funktioniert.

**>> Wir sind an mehreren Missionen in Zusammenarbeit mit etablierten Akteuren der Raumfahrtbranche beteiligt – auf nationaler wie internationaler Ebene.**

# Using artificial intelligence effectively – to support and accelerate our research activities

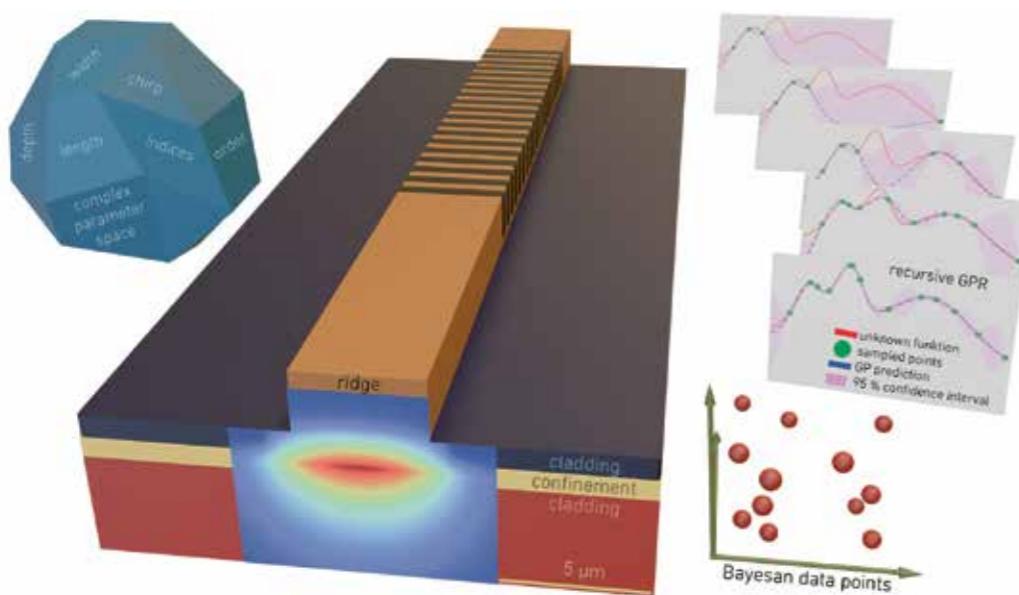
Smart and autonomous artificial intelligence (AI) methods are increasingly supporting our scientists in their research. Current projects – in the field of semiconductor laser design as well as RF power transistors – rely on AI-supported solutions to optimize and accelerate their developments. These include the DLR-funded InDIGO project (Inverse Design for Intelligent Grating Optimization), which aims at developing advanced tools for optimization of the Bragg waveguides of our diode lasers. It further convinced the jury of the Leibniz Association, which is funding the MATADOR project (Machine learning for Test Automation and Design-Optimization of Rf power transistors) in its competitive procedure (Leibniz competition).

## Optimizing Bragg waveguides for diode lasers using AI algorithms

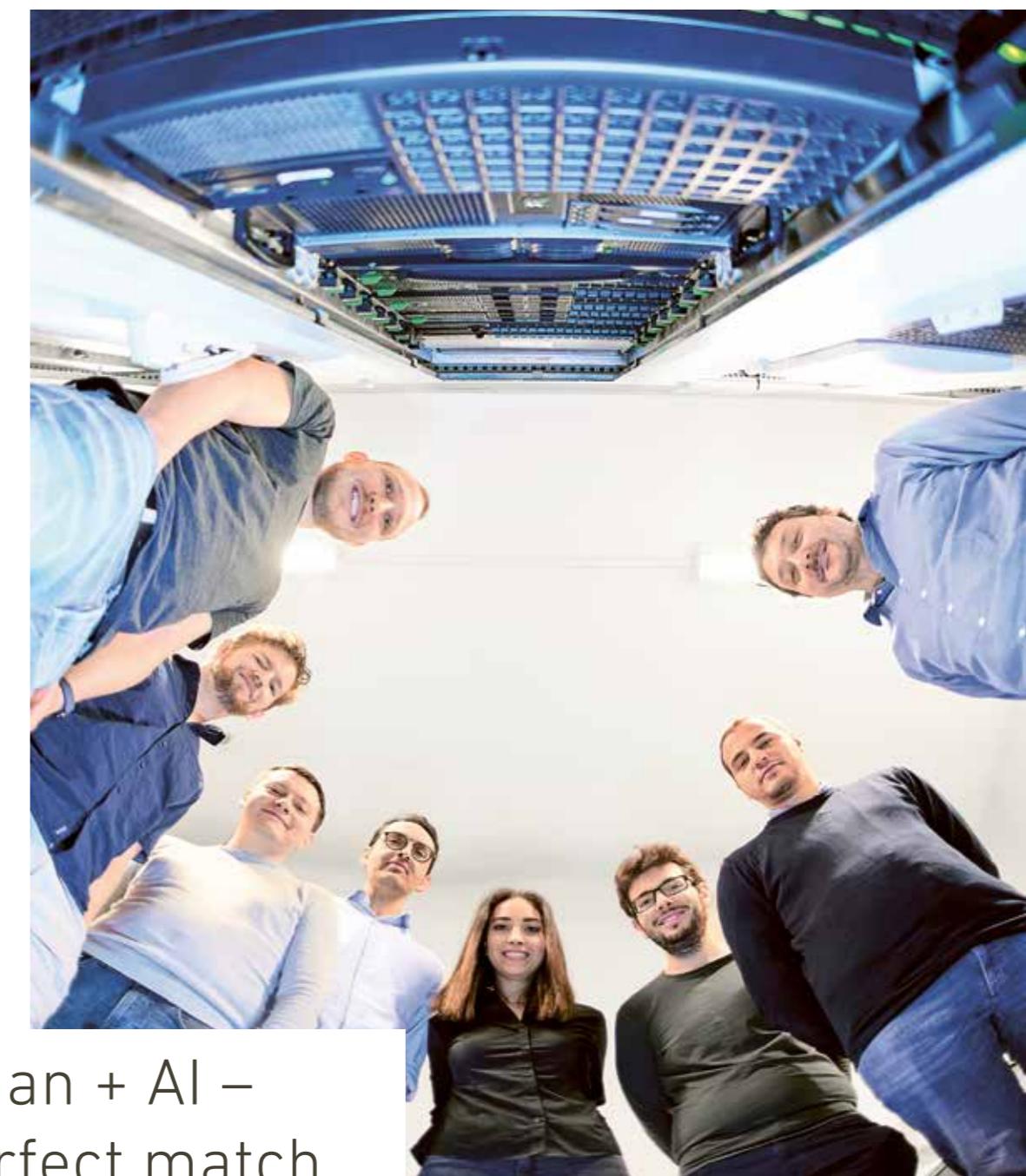
In the field of laser technology, we aim to develop even more precise, customized diode lasers for quantum sensing and space-based applications. Currently, one focus is on developing tools for the optimization of Bragg gratings in semiconductor ridge waveguides, utilizing even more precise simulations, optimized AI algorithms, and efficient databases for surrogate modelling. First of all, the accuracy of the simulations used to build the databases must be improved. They must accurately represent

our devices to precisely simulate their optical response. Recognizing that AI algorithms are susceptible to inaccuracies in training data, we first created a Bragg waveguide database through accurate 3D-Finite Difference Time Domain simulations. To cope with the numerical efforts, we then identified the AI algorithms that can be efficiently trained on small datasets. This has led to the implementation of AI algorithms that outperform others even with only half the amount of training data. After all, these databases still need to contain the maximum amount of information and data diversity, despite the limited number of data points, to comprehensively train the AI models on all features. We used Bayesian optimization to efficiently select the most informative data points. The AI algorithms trained this way consistently achieve high prediction accuracy with significantly fewer data points.

Looking ahead, we are currently extending our methodology beyond simulation data to incorporate experimental data points within the complex design space. By generating precisely produced test structures that are then characterized and measured, we aim to enrich our databases with intricacies of real-world insights. This approach not only strengthens the authenticity of our AI models but also enables rigorous benchmarking against real devices.



From left to right: schematic of the multi-dimensional parameter space, Bragg waveguide structure, and data generation process. Through intelligent data acquisition methods, one can train AI models on much fewer yet more informative data. Von links nach rechts: das Schema des multidimensionalen Parameterraums, die Bragg-Wellenleiterstruktur und der Prozess der Datengewinnung. Durch intelligente Methoden der Datenerfassung können KI-Modelle mit wesentlich weniger, jedoch informativeren Daten trainiert werden.



## Human + AI – a perfect match accelerating R&D.

Several teams at FBH actively use artificial intelligence (AI) methods to optimize and accelerate their developments. R&D activities of our scientists and technicians are targeting, for example, improved diode laser design through precise simulations, efficient AI algorithms, and informative databases. Another team is developing an autonomous AI-based transistor measurement system with quantified accuracy for various measurements. With this system, heterogeneous data from multiple sources of different quality can be replaced. Data is then analyzed with AI support to determine optimum design parameters that meet the final properties in the transistor optimization process.

Um ihre Entwicklungen zu verbessern und zu beschleunigen, nutzen mehrere Teams am FBH aktiv Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI). So setzen unsere Wissenschaftler\*innen und Techniker\*innen beispielsweise bei der Designoptimierung von Diodenlasern auf präzise Simulationen, effiziente KI-Algorithmen und informative Datenbanken. Ein anderes Team entwickelt ein autonomes KI-basiertes Messsystem, das verschiedene Messungen mit quantifizierter Genauigkeit ermöglicht. Damit lassen sich heterogene Daten aus verschiedenen Quellen mit unterschiedlicher Qualität ersetzen. Diese Daten werden dann mit KI-Unterstützung analysiert, um optimale Designparameter zu ermitteln, die den gewünschten Transistor-eigenschaften im Optimierungsprozess entsprechen.

## MATADOR: optimizing high-frequency power transistors with AI-assisted systems and accelerating development

Our energy-intensive information and communication technology already has a significant share of global energy consumption – and this will continue to increase. In particular, the power amplifiers of transmitters, which convert electrical current into electromagnetic waves, consume a lot of energy. In the interest of sustainable and resource-efficient electronics and communication technologies (Green ICT), more efficient transistor technologies are coming into focus, being more energy-saving while simultaneously delivering higher performance in higher frequency bands. To accelerate their development, we started the MATADOR project at FBH in 2023. The goal of this cooperative project with Technische Universität Berlin is to develop and bring more efficient communication technologies to market more quickly. The focus is on optimizing transistors based on gallium nitride (GaN). This material offers excellent high-frequency properties and is seen as a gateway to other promising semiconductors such as aluminum nitride.

MATADOR focuses on the measurement technology that every component goes through. Characterization often generates a massive amount of measurement data, making it challenging to correlate design parameters with the resulting properties of

the component. Therefore, MATADOR relies on multivariate statistical analyses based on machine learning (ML) to identify trends and hidden patterns. So far, however, the data comes from various measurement systems, delivering data of differing quality. These are now being consolidated and replaced by a universally applicable ML-controlled measurement system with the ability to autonomously cultivate new data. With the comprehensive pool of high-quality measurement data and the additional benefit of its quantified accuracy, design variants can be evaluated more quickly – significantly shortening the development process, especially for new technologies or materials.

At FBH, we use our active broadband load-pull system, which enables autonomous DC, small- and large-signal, as well as broadband measurements, and combine it with ML methods. Thanks to ML-based evaluation, the measurement system will in the future be able to autonomously decide whether additional measurements are necessary for further optimization to reach the desired goals. For example, the required performance of a GaN transistor can be specified, and using ML methods, the optimal epitaxial structure and physical layout of the transistor necessary to achieve this can be derived.

**>> Looking ahead, we are currently extending our methodology beyond simulation data to incorporate experimental data points within the complex design space.**

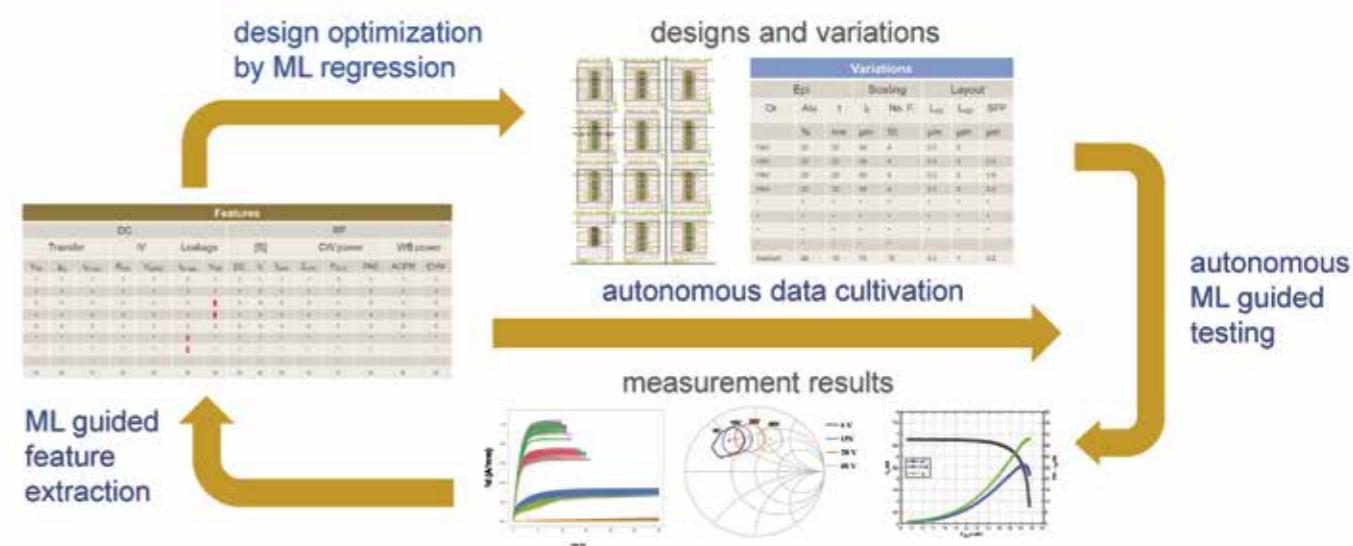
## Künstliche Intelligenz effektiv nutzen – zur Unterstützung und Beschleunigung unserer Forschungsaktivitäten

Intelligente und autonome Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) unterstützen unsere Wissenschaftler\*innen zunehmend in ihrer Forschung. Aktuelle Projekte – im Bereich des Designs von Halbleiterlasern sowie Hochfrequenz (HF)-Leistungstransistoren – setzen auf KI-gestützte Lösungen, um die zugehörigen Entwicklungen zu optimieren und zu beschleunigen. Dazu zählt unter anderem das vom DLR geförderte Projekt InDIGO (Inverse Design für intelligente Gitteroptimierung), in dem KI-basierte Methoden zur Optimierung des Designs von Bragg-Wellenleitern entwickelt werden. MATADOR (Maschinelles Lernen für Testautomatisierung und Design-

Optimierung von HF-Leistungstransistoren) wiederum überzeugte die Jury der Leibniz-Gemeinschaft in ihrem internen Wettbewerbsverfahren (Leibniz-Wettbewerb), die das Projekt nun fördert.

### Wellenleiter von Diodenlasern optimieren mit KI-Algorithmen

Im Bereich der Lasertechnologie wollen wir noch präzisere, maßgeschneiderte Diodenlaser für die Quantensensorik und für weltraumbasierte Anwendungen entwickeln. Derzeit fokussieren wir uns auf die Entwicklung von Methoden zur Opti-



Design optimization based on the MATADOR project – with autonomous cultivation of new data.  
Designoptimierung, die auf dem MATADOR-Projekt basiert – mit autonomer Pflege von neuen Daten.

mierung des Designs von Bragg-Wellenleitern mithilfe von noch präziseren Simulationen, optimierten KI-Algorithmen und effizienten Datenbanken für Surrogat-Modelle. Dafür muss zunächst die Genauigkeit der Simulationen verbessert werden, mit denen die Datenbanken erstellt werden. Sie müssen die Wellenleiterstrukturen präzise beschreiben, um deren optischen Response möglichst genau vorhersagen zu können. Da KI-Algorithmen anfällig für Ungenauigkeiten in den Trainingsdaten sind, haben wir zunächst eine Datenbank für Bragg-Wellenleiterstrukturen mittels hochpräziser 3D-Finite Difference Time Domain-Simulationen erstellt. Um den numerischen Aufwand zu begrenzen, haben wir jene KI-Algorithmen identifiziert, die effizient auf kleinen Datensätzen trainiert werden können. Dadurch konnten wir die Algorithmen implementieren, die bereits beim Training mit nur der Hälfte der Daten andere in ihrer Vorhersagegenauigkeit übertreffen. Schließlich müssen diese Datenbanken trotz der begrenzten Anzahl von Datenpunkten weiterhin maximale Informationen und Datenvielfalt enthalten, um die KI-Modelle umfassend auf alle Merkmale zu trainieren. Wir haben die Bayes'sche Optimierung verwendet, um die Datenpunkte effizient auszuwählen, die die Variation des Modells optimal abbilden. Entsprechend trainierte KI-Algorithmen, die Surrogat-Modelle auf dermaßen optimierten Datenbanken nutzen, erzielen durchweg hohe Vorhersagegenauigkeiten bei deutlich weniger Datenpunkten.

In Zukunft werden wir unsere Methodik über Simulationsdaten hinaus erweitern, um experimentelle Datenpunkte in den komplexen Designraum einzubeziehen. Indem wir Teststrukturen präzise herstellen, die wir dann charakterisieren und vermessen, wollen wir unsere Datenbanken mit den Feinheiten realer Erkenntnisse anreichern. Dieser Ansatz erhöht nicht nur die Authentizität unserer KI-Modelle, sondern ermöglicht auch einen exakten Vergleich mit realen Wellenleiterstrukturen.

### MATADOR: HF-Leistungstransistoren mit KI-gestütztem System optimieren und schneller entwickeln

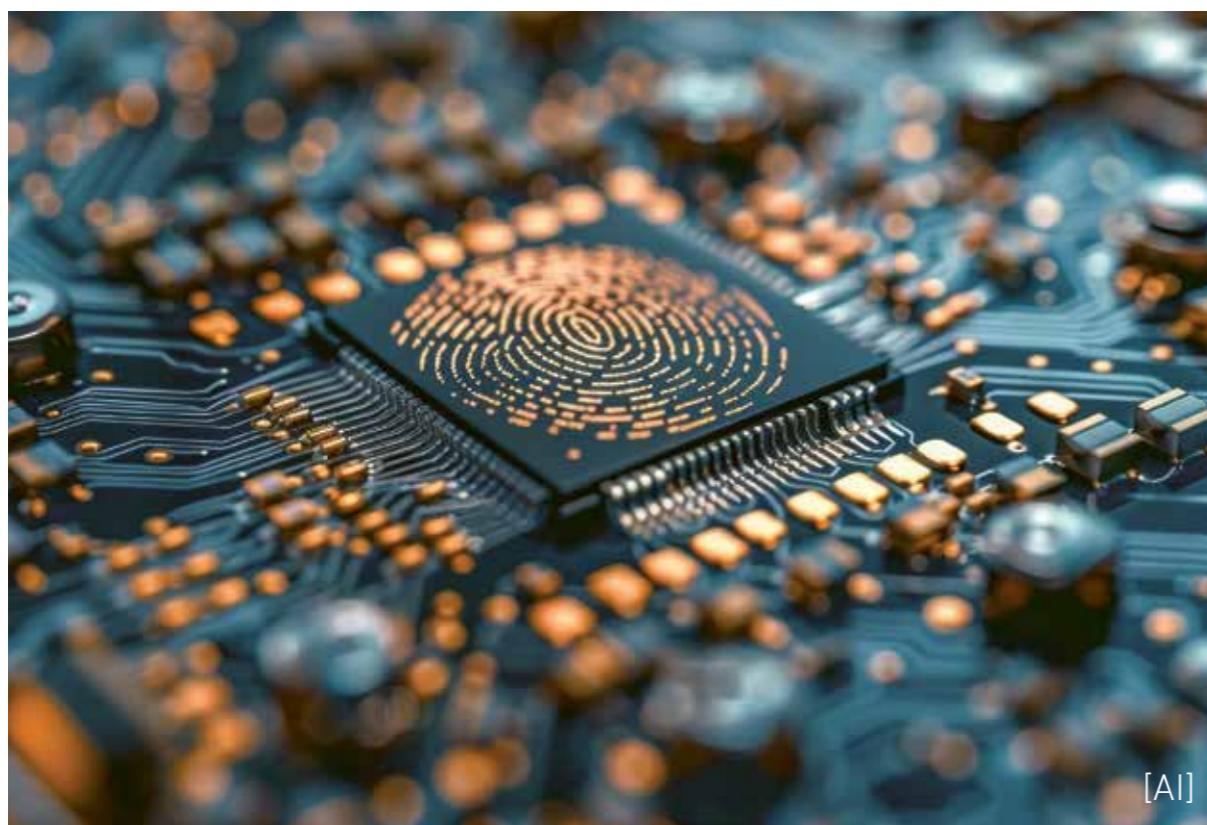
Unsere energiehungrige Informations- und Kommunikationstechnik hat bereits heute einen signifikanten Anteil am weltweiten Energieverbrauch – der weiter steigen wird. Insbesondere die Leistungsverstärker von Sendern, die elektrischen Strom in elektromagnetische Wellen umwandeln, verbrauchen sehr viel Energie. Im Sinne nachhaltiger und ressourceneffizienter Elektronik und Kommunikationstechnologien (Green ICT) rücken effizientere Transistor-technologien in den Fokus, die energiesparender sind – mit zugleich höherer Leistung in höheren Frequenzbändern. Um deren Entwicklung zu beschleunigen, haben wir am FBH 2023 das Projekt MATADOR gestartet. Ziel des kooperativen Projektes mit der TU Berlin ist es, schneller effizientere Kommunikationstechnologien zu entwickeln und auf den Markt zu bringen. Der Fokus liegt dabei auf der Optimierung von Transistoren auf der Basis von

Galliumnitrid (GaN). Das Material bietet exzellente Hochfrequenz-Eigenschaften und gilt als Türöffner für weitere vielversprechende Halbleiter wie Aluminiumnitrid.

MATADOR setzt bei der Messtechnik an, die jedes Bauelement durchläuft. Bei Charakterisierungen entsteht oft eine riesige Menge an Messdaten, die es erschweren, die Entwurfsparameter den daraus resultierenden Eigenschaften des Bauteils zuzuordnen. Daher setzt MATADOR auf multivariate statistische Analysen, die auf maschinellem Lernen (ML) basieren, um Trends und verborgene Muster zu erkennen. Bislang stammen die Daten dafür jedoch aus verschiedenen Quellen, die Daten in unterschiedlicher Qualität liefern. Diese werden nun in dem universell einsetzbaren ML-kontrollierten Messsystem mit der Fähigkeit, neue Daten autonom zu pflegen, zusammengeführt und analysiert. Mit dem umfassenden Pool an hochwertigen Messdaten und dem zusätzlichen Vorteil ihrer quantifizierten Genauigkeit lassen sich Designvarianten schneller auswerten – was insbesondere bei neuen Technologien oder Materialien den Entwicklungsprozess deutlich verkürzt.

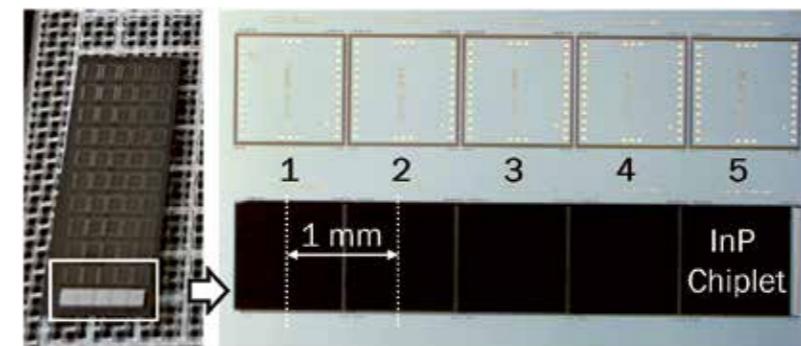
Am FBH setzen wir dafür unser aktives Breitband-Load-Pull-System ein, das autonome DC-, Klein- und Großsignal- sowie Breitbandmessungen ermöglicht, und verbinden es mit ML-

Methoden. Das Messsystem kann dank der ML-basierten Auswertung künftig autonom entscheiden, ob zusätzliche Messungen erforderlich sind, um mit weiteren Optimierungen die angestrebten Ziele zu erreichen. So soll etwa die benötigte Leistung eines GaN-Transistors spezifiziert und mithilfe von ML-Methoden die dafür erforderliche optimale Epitaxiestruktur und das physikalische Layout des Transistors abgeleitet werden können.



Artificial intelligence (AI) methods are increasingly supporting scientists in their research.  
Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) unterstützen Wissenschaftler\*innen zunehmend bei ihren Forschungsarbeiten.

## The best of both worlds – heterointegration of silicon and indium phosphide for 6G applications



Consecutively flip-chip bonded integrated circuits with a spacing of 1 mm (corresponds to the chip spacing on the wafer).  
Nacheinander Flip-Chip-gebondete integrierte Schaltkreise mit einem Abstand von 1mm (entspricht dem Chipabstand auf dem Wafer).

Wireless communication for 6G applications, as well as radar systems, require components that operate at frequencies beyond 100 GHz. Common silicon (Si) and silicon-germanium (SiGe) based CMOS techniques (CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) are reaching their limits in this domain. Therefore, alternative technologies based on indium phosphide (InP) could complement high-frequency (HF) applications in Si-CMOS, enhancing their performance and efficiency. Despite their superior HF properties, these InP technologies are limited to certain functions and cannot compete with silicon-based CMOS in terms of volume scalability and technological maturity. Advanced integration techniques that combine the advantages of both technologies, beyond conventional monolithic solutions, offer a solution.

At frequencies from 100 GHz to 300 GHz, indium phosphide offers high signal power and low noise with high energy efficiency. This enables high data throughput and high transmission power. At FBH, we have established a high-performance InP-DHBT process (DHBT = Double Heterojunction Bipolar Transistor), which can also be hybridly integrated with silicon technologies such as Bi-CMOS or CMOS. This allows us to create compact, highly functional multi-chiplet submounts, enabling seamless integration of baseband and frontend components.

The InP technology at FBH is insofar unique that it also enables heterointegration of silicon-based processes at wafer and chip levels. Such heterointegration is crucial for 6G communication and radar sensing. Signal transitions, which are associated with high losses at frequencies > 140 GHz, can be avoided outside the chip. This also increases the complexity of the frontend components, since the more efficient, powerful circuits based on InP can be perfectly integrated into the high complexity of silicon-based processes. Therefore, heterointegration is a fundamental technology that enables seamless transition from one technology to another through broadband chip-to-chiplet connections. Our low-temperature flip-chip assembly process developed at FBH with indium-based micropillars allows this with minimal losses up to over 300 GHz.

Using this technology, we successfully integrated a compact 90 GHz power amplifier into a passive BiCMOS chip in the BMBF-funded 6G-RIC project. Thanks to the excellent high-frequency performance of this heterointegration technology, the integrated amplifier showed comparable performance to measurements of individual chips.

Looking ahead, we plan to realize a complete system of transmitter and receiver unit with a heterointegrated InP-on-BiCMOS chip together with our partner institute Leibniz IHP. IHP brings its expertise in SiGe-BiCMOS technologies to the project.

» The InP technology at FBH is insofar unique that it also enables heterointegration of silicon-based processes at wafer and chip levels.

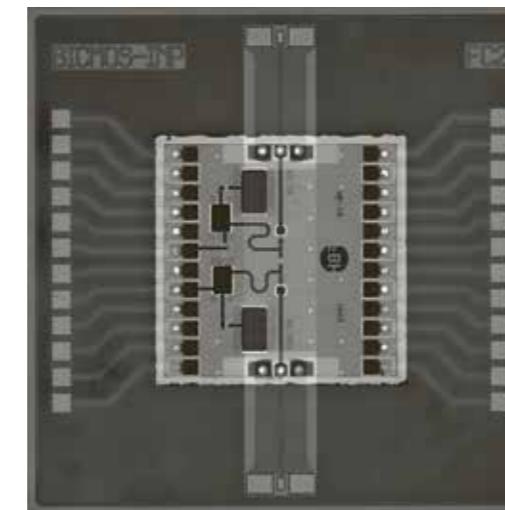
## Das Beste zweier Welten – Heterointegration von Silizium und Indiumphosphid für 6G-Anwendungen

Die drahtlose Kommunikation für 6G-Anwendungen ebenso wie Radarsysteme benötigen Komponenten, die bei Frequenzen jenseits von 100 GHz arbeiten. Herkömmliche Silizium (Si)- und Silizium-Germanium (SiGe)-basierte CMOS-Techniken (CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) stoßen hier an ihre Grenzen. Daher könnten alternative Technologien auf Basis von Indiumphosphid (InP) Hochfrequenzanwendungen (HF) in Si-CMOS so ergänzen, dass deren Leistung und Effizienz steigen. Trotz ihrer überlegenen HF-Eigenschaften sind diese InP-Technologien jedoch auf bestimmte Funktionen beschränkt. Auch hinsichtlich Skalierbarkeit des Volumens und Technologiereifegrad können sie nicht mit CMOS auf Silizium-Basis konkurrieren. Einen Ausweg bieten fortgeschrittene Integrationstechniken, die die Vorteile beider Technologien kombinieren – und das jenseits konventioneller monolithischer Lösungen.

Bei Frequenzen von 100 GHz bis 300 GHz bietet Indiumphosphid eine hohe Signalleistung und ein geringes Rauschen bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Das ermöglicht einen hohen Datendurchsatz und eine hohe Sendeleistung. Am FBH haben wir einen leistungsfähigen InP-DHBT-Prozess (DHBT = Double Heterojunction Bipolar Transistor) etabliert, der zusätzlich mit Siliziumtechnologien wie Bi-CMOS oder CMOS hybrid integriert werden kann. Damit lassen sich kompakte, hochfunktionale Multi-Chiplet-Submounts aufbauen, die eine nahtlose Integration der Basisband- und Frontend-Komponenten erlauben.

Die InP-Technologie des FBH ist insofern einzigartig, als sie auch die Heterointegration von Silizium-basierten Prozessen auf Wafer- und Chip-Ebene ermöglicht. Eine solche Heterointegration ist für die 6G-Kommunikation und die Radar-

**>> Die InP-Technologie des FBH ist insofern einzigartig, als sie auch die Heterointegration von Silizium-basierten Prozessen auf Wafer- und Chip-Ebene ermöglicht.**



BiCMOS chip with precisely aligned InP amplifier immediately before bonding.  
BiCMOS-Chip mit präzise ausgerichtetem InP-Verstärker unmittelbar vor dem Bonden.

fassung entscheidend. So lassen sich Signalübergänge, die bei Frequenzen > 140 GHz mit hohen Verlusten verbunden sind, außerhalb des Chips vermeiden. Dies erhöht zudem die Komplexität der Frontend-Komponenten, da sich die effizienteren, leistungsfähigeren Schaltungen auf InP-Basis in die hohe Komplexität von Si-basierten Prozessen perfekt integrieren lassen. Die Heterointegration ist demnach eine Grundlagentechnologie, die mithilfe von breitbandigen Chip-zu-Chiplet-Verbindungen den nahtlosen Übergang von einer Technologie zur anderen ermöglicht. Unser am FBH entwickelter Niedertemperatur-Flip-Chip-Aufbauprozess mit Indium-basierten Mikropillars ermöglicht dies mit nur minimalen Verlusten bis zu mehr als 300 GHz.

Mit dieser Technologie haben wir im BMBF-geförderten 6G-RIC-Projekt einen kompakten 90-GHz-Leistungsverstärker erfolgreich in einen passiven BiCMOS-Chip integriert. Dank der hervorragenden Hochfrequenz-Leistung dieser Heterointegrationstechnologie zeigte der integrierte Verstärker eine vergleichbare Leistung zu Messungen einzelner Chips.

Perspektivisch planen wir gemeinsam mit unserem Partnerinstitut Leibniz IHP ein komplettes System aus Sende- und Empfangseinheit mit einem heterointegrierten InP-auf-BiCMOS-Chip zu realisieren. Das IHP bringt hierbei sein Know-how bei SiGe-BiCMOS-Technologien ein.

## High-performance InP-HBT MMIC process for future communication, IoT, and radar applications

With the increasing demand for data transfer with ever higher data rates for communication and IoT applications, indium phosphide (InP) has emerged as the material of choice due to its favorable properties for high-frequency applications. Owing to its excellent transport properties, highly efficient circuits can be realized based on this material. We offer a fully-stacked MMIC process utilizing an InP heterojunction bipolar junction transistor (HBT) at its heart.

The process runs on 100 mm multi-project wafers (MPWs) comprising models and a process design kit (PDK). The MPW runs benefit from our 2,000 m<sup>2</sup> state-of-the-art cleanroom laboratories available at FBH. These facilities provide RF circuit designers with the required tools to realize high-performance circuits and modules for frequencies from 90 to 200 GHz. Heterointegration and packing activities have been also demonstrated for these high frequency ranges, showing minimal transition losses up to 300 GHz.

### Leistungsfähiger InP-HBT MMIC-Prozess für zukünftige Kommunikations-, IoT- und Radaranwendungen

Für Kommunikations- und IoT-Anwendungen müssen Daten mit immer höheren Übertragungsraten übermittelt werden. Indiumphosphid (InP) hat sich dank seiner vorteilhaften Eigenschaften als Material der Wahl für derartige Hochfrequenzanwendungen entpuppt. Aufgrund seiner hervorragenden Übertragungseigenschaften lassen sich damit hocheffiziente Schaltungen realisieren. Wir bieten einen vollständig gestackten MMIC-Prozess an, in dessen Zentrum ein InP-basierter bipolarer Heteroübergangstransistor (HBT) steht.

Der Prozess läuft auf 100-mm-Multiprojekt-Wafern (MPWs) und umfasst Modelle und ein Prozessdesign-Kit (PDK). Die MPW-Prozesse führen wir in unseren 2.000 m<sup>2</sup> großen, hochmodernen Reinraumlaboratorien am FBH durch. Diese Infrastruktur bietet Entwicklern von HF-Schaltungen die erforderlichen Möglichkeiten, um Hochleistungsschaltungen und -module für Frequenzen von 90 bis 200 GHz zu realisieren. Auch die Heterointegration und das Packaging haben wir für diese hohen Frequenzbereiche demonstriert, wobei die Übergangsverluste bis 300 GHz minimal waren.



100 mm fully processed InP-HBT MMIC wafer.  
Vollständig prozessierter 100 mm Wafer mit InP-HBT-MMICs.



Compact digital GaN-based class-E outphasing PA module; size: 50 x 45 mm<sup>2</sup>.

Kompaktes digitales GaN-basiertes Klasse-E-Outphasing-Leistungsverstärker-Modul; Größe: 50 x 45 mm<sup>2</sup>.

## A 4 GHz digital class-E outphasing PA for highly efficient 5G base stations

The requirements for wireless systems for modern 5G/6G mobile communication continue to increase. Ever higher data rates and more complex modulation methods also make the design of energy-efficient transmitter architectures more challenging than ever. To meet the growing requirements, we have combined the classic digital class-E switch mode amplifier approach with the outphasing concept. Recently, we were able to introduce the first GaN-based digital class-E outphasing amplifier module for 5G base station applications from 4 to 6 GHz.

It uses two compact digital amplifier chips fabricated with FBH's 0.25 µm GaN HEMT technology. A bond-wire based load network combines the two outputs for outphasing and ensures maximum efficiency. Efficiencies of up to 84 % and an output power of 8.4 W have been achieved. In addition, the linearized amplifier delivers an efficiency of 46 % with a 20 MHz LTE input signal.

The new class-E outphasing module is particularly flexible in terms of digital inputs and operating modes, making it ideal for reducing the energy consumption of 5G base stations.

## Ein digitaler 4 GHz Klasse-E-Outphasing-Leistungsverstärker für hocheffiziente 5G-Basisstationen

Die Anforderungen an drahtlose Systeme für die moderne 5G/6G-Mobilkommunikation steigen weiter. Immer höhere Datenraten und komplexere Modulationsverfahren machen auch das Design von energieeffizienten Senderarchitekturen anspruchsvoller denn je. Um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden, haben wir den klassischen digitalen Klasse-E-Schaltverstärkeransatz mit dem Outphasing-Konzept kombiniert. Kürzlich konnten wir das erste GaN-basierte digitale Klasse-E-Outphasing-Verstärkermodul für 5G-Basisstationenapplikationen von 4 bis 6 GHz vorstellen.

Das Modul besteht aus zwei kompakten digitalen Verstärkerchips, die mit der 0,25 µm GaN-HEMT-Technologie des FBH hergestellt wurden. Ein Bonddraht-basiertes Ausgangsnetzwerk kombiniert die beiden Ausgänge für das Outphasing und sorgt für maximale Effizienz. Damit konnten wir Wirkungsgrade von bis zu 84 % und eine Ausgangsleistung von 8,4 W erreichen. Darüber hinaus liefert der linearisierte Verstärker einen Wirkungsgrad von 46 % bei einem LTE-Eingangssignal von 20 MHz.

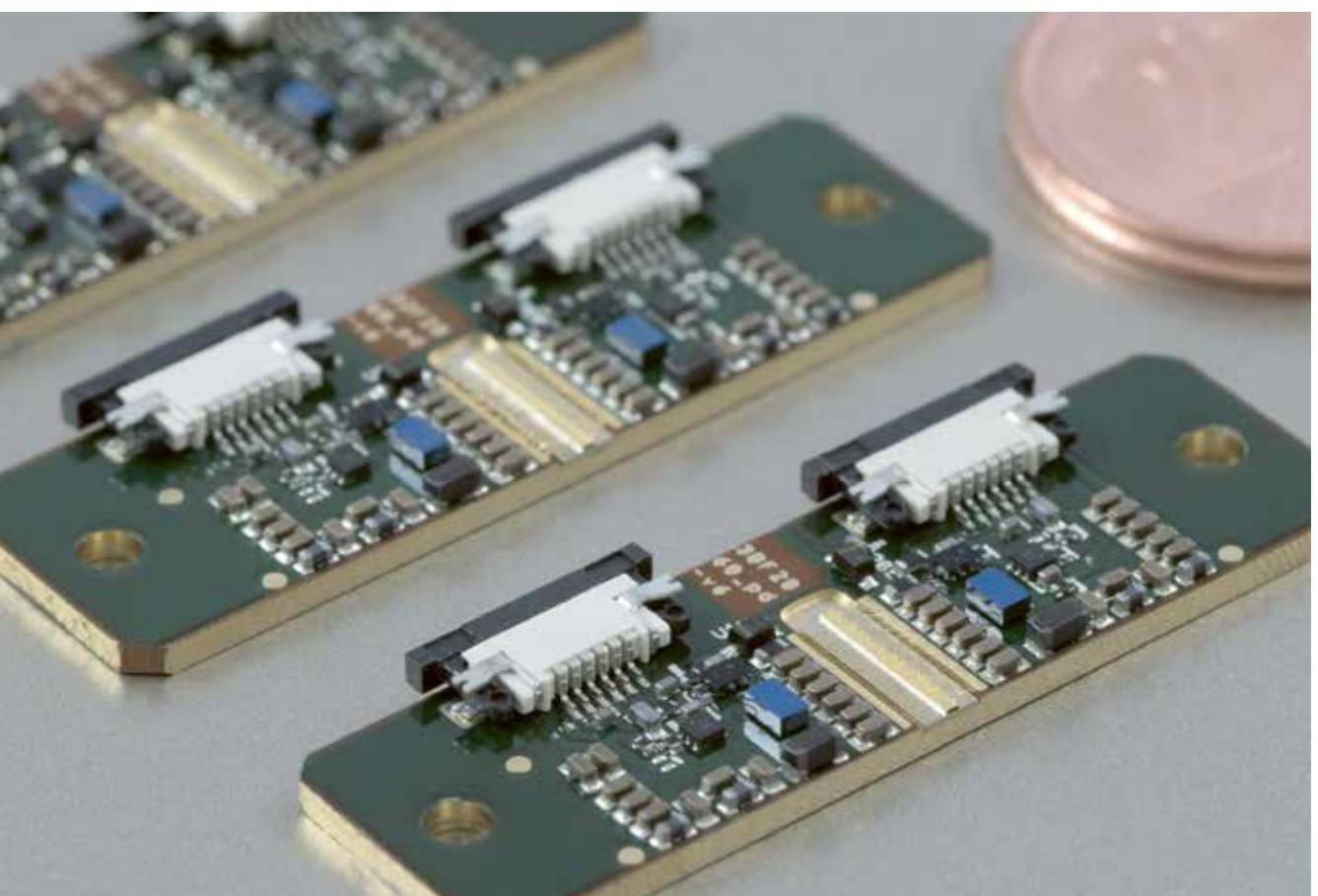
Das neue Klasse-E-Outphasing-Modul ist besonders flexibel hinsichtlich digitaler Eingänge und Betriebsmodi und eignet sich daher ideal zur Reduzierung des Energieverbrauchs von 5G-Basisstationen.

## Tunnel diode-based diode lasers with excellent performance for LiDAR applications

FBH is also breaking new technological ground with its diode lasers featuring several active zones and tunnel transitions in a common waveguide. The intensity profile of the emitted light power has several maxima in vertical direction due to higher vertical waveguide modes. As a result, the output power is increased. For the first time world-wide, our scientists have stabilized the wavelength of such diode lasers by incorporating a Bragg grating. Compared to conventional bipolar cascade lasers (stack lasers), the dependence of the emission wavelength on temperature and the width of the optical spectrum have thus been greatly reduced. These features are particularly advantageous for LiDAR applications.

We have developed particularly well performing DBR lasers that emit at a wavelength of 905 nm with 3 active zones, 4 mm long resonator (L), and 50 µm stripe width (w). The 48-emitter bars deliver a high output power of 2,200 watts in nanosecond operation at a pulse current of 1,100 amperes. For a single emitter with 5 active zones (L = 4 mm, w = 200 µm), the pulse power is 284 watts at a pulse current of 111 amperes. Compared to a DBR laser with only one active zone, we were able to increase the pulse power almost threefold with the same pulse current. DFB lasers realized with identical epitaxial design show comparable performance – with an even shorter resonator length of 1 mm. For comparison: 6 mm long DBR lasers with a stripe width of 100 µm, without tunnel diodes developed in a preliminary project, only achieved an output power of 50 watts at a pulse current of 120 amperes.

Technology platform for LiDAR applications on which laser diodes with drivers and control electronics can be flexibly integrated.  
Technologieplattform für LiDAR-Anwendungen, auf die Laserdioden mit Treibern und Steuerelektronik flexibel integriert werden können.



## Tunneldioden-basierte Diodenlaser mit exzellenten Ergebnissen für LiDAR-Anwendungen

Technologisches Neuland betritt das FBH auch mit seinen Diodenlasern, bei denen mehrere aktive Zonen und Tunnelübergänge in einem gemeinsamen Wellenleiter platziert wurden. Dabei weist das Intensitätsprofil der abgestrahlten Lichtleistung in vertikaler Richtung durch höhere vertikale Wellenleitermoden mehrere Maxima auf. Dadurch erhöht sich die Ausgangsleistung. Weltweit erstmalig haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Wellenlänge derartiger Diodenlaser durch ein integriertes Bragg-Gitter stabilisiert. Dadurch ist es gelungen, die Abhängigkeit der Emissionswellenlänge von der Temperatur und die Breite des optischen Spektrums gegenüber konventionellen bipolaren Kaskadenlasern (Stacklasern) stark zu reduzieren. Dies ist besonders vorteilhaft für LiDAR-Anwendungen.

Wir haben besonders leistungsstarke DBR-Laser mit 3 aktiven Zonen, 4 mm langem Resonator (L) und 50 µm Streifenbreite (w) entwickelt, die bei einer Wellenlänge von 905 nm emittieren. Die Barren mit 48 Emittoren liefern im Nanosekundenbetrieb bei einem Pulsstrom von 1.100 Ampere eine hohe Ausgangsleistung von 2.200 Watt. Bei einem einzelnen Emitter mit 5 aktiven Zonen ( $L = 4 \text{ mm}$ ,  $w = 200 \mu\text{m}$ ) beträgt die Pulsleistung 284 Watt bei einem Pulsstrom von 111 Ampere. Im Vergleich zu einem DBR-Laser mit nur einer aktiven Zone konnten wir so die Pulsleistung bei gleichem Pulsstrom fast um das Dreifache steigern. DFB-Laser, die mit dem gleichen Epitaxiedesign realisiert wurden, zeigen vergleichbare Leistungen – bei noch kürzerer Resonatorlänge von 1 mm. Zum Vergleich: In einem Vorprojekt entwickelte 6 mm lange DBR-Laser mit 100 µm Streifenbreite ohne Tunneldioden erreichten bei einem Pulsstrom von 120 Ampere lediglich 50 Watt Ausgangsleistung.

## VCSEL @ FBH: high demand for the efficient light sources with excellent properties

The FBH has extensive and long-standing experience in researching and developing vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs). This laser type emits light in a cone-shaped beam vertically to the plane of the chip. VCSELs score with their optimized beam profile, narrow spectral linewidth, and excellent energy efficiency, among others. Their features make them ideally suited for industrial and a wide range of further applications.

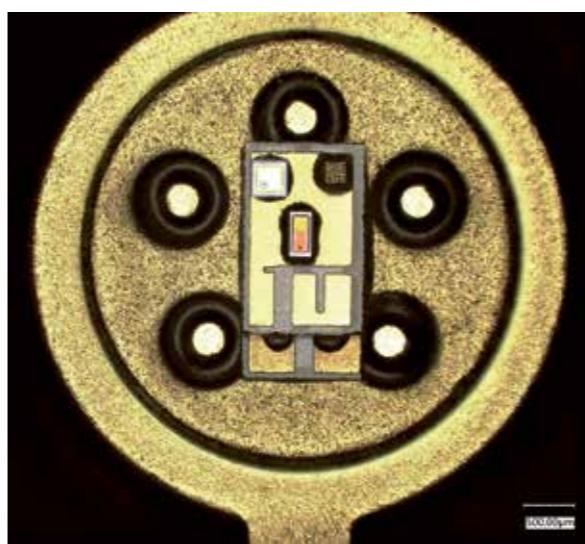
Meanwhile, we have adapted our reliable VCSEL growth technology that delivers outstanding results also for optically pumped surface emitters and especially optical switches (SESAMs) for pulsed layer systems. These SESAMs are commercially supplied to a number of industrial and academic partners within confidential contracts. In recent years, the demand for these devices has even increased as evidenced by an ever-higher number of related projects.

Also, industrial partners have chosen FBH for the joint development of new types of VCSELs. For example, for the QYRO project which targets new space applications and is funded by BMBF within the initiative "Leuchtturmprojekte der quantenbasierten Messtechnik". A compact space-suited quantum gyroscope will be developed, ensuring the long-term attitude stability and ori-

entation of satellites in space. The technological approach also promises improved navigation of vehicles on land, at sea, and in the air. The FBH is developing the necessary VCSEL heterostructures emitting at 796 nm that are processed and packaged by the partner TRUMPF. The lasers will then be integrated by Q.ANT and Bosch – in a first step into a terrestrial test setup and finally into a flight model to be launched by the German Aerospace Center (DLR).

In a recent activity, we started the BMBF-funded project ED-VECSEL (electrically pumped semiconductor disk laser for ultra-short pulse generation). This FBH-coordinated project aims to pave the way for electrically pumped systems emitting in the fundamental mode with high power. The system is designed to allow for a simple assembly of the laser source including optical elements like collimation lenses. Such systems are considered very attractive, e.g., for material processing, but do not exist so far as current injection adapted to the beam shape is not yet possible. We are developing the required electrically pumped semiconductor structure with a large emission surface and a matching resonator, and integrating it into an external cavity jointly with Laser Zentrum Hannover.

## VCSEL @ FBH: starke Nachfrage nach den effizienten Lichtquellen mit den hervorragenden Eigenschaften



↑ VCSEL chip processed at TRUMPF Photonic Components from wafers developed at FBH and mounted on TO header by TRUMPF Laser Berlin.

VCSEL-Chip, der bei TRUMPF Photonic Components prozessiert wurde. Die Wafer wurden am FBH entwickelt und von TRUMPF Laser Berlin auf TO-Header montiert.

Das FBH erforscht und entwickelt seit vielen Jahren oberflächenemittierende Laser mit vertikalem Resonator (VCSEL). Dieser Lasertyp emittiert Licht in einem kegelförmigen Strahl senkrecht zur Chipebene. VCSELs punkten unter anderem mit einem optimierten Strahlprofil, einer schmalen spektralen Linienbreite und einer ausgezeichneten Energieeffizienz. Dank dieser Eigenschaften eignen sie sich hervorragend für industrielle und eine Vielzahl weiterer Anwendungen.

Unsere zuverlässige VCSEL-Wachstumstechnologie, mit der wir hervorragende Ergebnisse erzielen, haben wir inzwischen auf optisch gepumpte Oberflächenemitter und insbesondere optische Schalter (SESAMs) für gepulste Schichtsysteme erweitert. Diese SESAMs liefern wir kommerziell an verschiedenste industrielle und akademische Partner im Rahmen vertraulicher Verträge. Die Nachfrage nach diesen Bauelementen ist in den vergangenen Jahren sogar noch gestiegen, was die stetig wachsende Zahl entsprechender Projekte wider spiegelt.

Gemeinsam mit Industriepartnern entwickeln wir zudem neue VCSEL-Typen. Dazu zählt unter anderem das QYRO-Projekt, das auf neuartige Raumfahrtanwendungen zielt und vom

BMBF im Rahmen der Initiative „Leuchtturmprojekte der quantenbasierten Messtechnik“ gefördert wird. Entwickelt wird darin ein kompaktes, weltraumtaugliches Quantengyroskop, das die langfristige Lagestabilität und Orientierung von Satelliten im Weltraum gewährleisten soll. Der technologische Ansatz verspricht auch eine bessere Navigation von Fahrzeugen zu Lande, zu Wasser und in der Luft. Am FBH entwickeln wir die dafür notwendigen VCSEL-Heterostrukturen, die bei 796 nm emittieren und vom Partner TRUMPF weiter prozessiert und aufgebaut werden. Die Laser werden dann von Q.ANT und Bosch integriert – in einem ersten Schritt in einen terrestrischen Testaufbau und schließlich in ein Flugmodell, das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) auf den Weg gebracht werden soll.

Kürzlich haben wir das vom BMBF geförderte und vom FBH koordinierte Projekt ED-VECSEL (elektrisch gepumpter Halbleiter-Scheibenlaser zur Erzeugung ultrakurzer Pulse) gestartet. Dieses will elektrisch gepumpten Systemen den Weg ebnen, die im Grundmode mit hoher Leistung emittieren. Das zu entwickelnde System ist so konzipiert, dass die Laserquelle einschließlich optischer Elemente, wie etwa Kollimationslinsen, sehr einfach aufgebaut werden kann. Solche Systeme sind für Anwendungen wie etwa die Materialbearbeitung hochattraktiv, existieren aber bisher nicht, da eine an die Strahlform angepasste Strominjektion noch nicht möglich ist. Wir entwickeln die erforderliche elektrisch gepumpte Halbleiterstruktur mit großer Emissionsfläche und passendem Resonator. Gemeinsam mit dem Laser Zentrum Hannover integrierten wir sie dann in eine externe Kavität.

**>> VCSELs punkten unter anderem mit einem optimierten Strahlprofil, einer schmalen spektralen Linienbreite und einer ausgezeichneten Energieeffizienz.**



## Our technical hub.

Our Technical Services team – from plant mechanics to electricians and janitors – ensure that technical processes at FBH run smoothly. This 10-person team serves as a central hub with a wide range of tasks: repairing ventilation systems, ensuring electrical connections and the supply of gases, water, and air in the laboratories. They also maintain the locking system, ensure the cleanliness of cleanroom clothing, assist with relocations, and trim the hedges surrounding the institute.

Unsere Technischen Dienste – vom Anlagenmechaniker über die Elektrikerin bis hin zu den Hausmeistern – sorgen für reibungslose technische Abläufe am FBH. Das 10-köpfige Team ist eine zentrale Schnittstelle mit vielfältigen Aufgaben: Die Kolleg\*innen reparieren Lüftungsanlagen und sorgen dafür, dass Anlagen in den Laboren elektrisch angeschlossen und mit Gasen, Wasser und Luft versorgt werden. Sie kümmern sich auch um die Schließanlage, sorgen für saubere Reinraumkleidung, unterstützen bei Umzügen und stutzen die Hecken rund ums Institut.

## ERDF projects completed: reconstruction of the cleanroom & increased technological maturity

The ERDF-funded expansion of the application laboratory III-V components for laser technology and electronics – cleanroom reconstruction ZMM has been completed. The aim of the project was to extensively upgrade and retrofit the technical infrastructure in cleanroom 2 and to adapt it to new, powerful, and more energy-efficient technologies.

In another ERDF project, we have increased the technological maturity of our processes and broadened them for industrial applications. The processes for GaAs lasers as well as for GaN and InP electronics were further optimized in the application laboratory III-V components for laser technology and electronics. The mounting and assembly technology for laser diodes and electronic chips was further developed and cleanroom processes were digitalized.

## EFRE-Projekte abgeschlossen: Umbau des Reinraums & Erhöhen der Technologiereife

Der mit EFRE-Mitteln geförderte Ausbau des Applikationslagers III/V-Komponenten für Lasertechnik und Elektronik – Reinraumumbau ZMM ist abgeschlossen. Das Vorhaben zielt darauf ab, die technischen Infrastruktur im Reinraum-2 umfangreich auf- und nachzurüsten und auf neue, leistungsfähige und energieeffizientere Technologien umzustellen.

In einem weiteren EFRE-Projekt haben wir den Technologiegrad unserer Prozesse erhöht und für industrielle Anwendungen breiter aufgestellt. Im Applikationslabor III/V-Komponenten für Lasertechnik und Elektronik wurden die Prozesse für GaAs-Laser sowie für die GaN- und InP-Elektronik weiter optimiert. Die Aufbau- und Verbindungstechnik für Laserdioden und Elektronik-Chips wurde weiterentwickelt sowie die Reinraumprozesse digitalisiert.

## MES – successfully navigating our way to digital semiconductor processing

In the past year, we have achieved a remarkable milestone by successfully transitioning to digital processing with the help of a Manufacturing Execution System (MES), marking a significant leap forward in our operational capabilities. This strategic shift lifts us to semiconductor industry standards, while retaining the flexibility needed for explorative R&D processes. It also ensures seamless integration and expansion of our capabilities within the joint activities of Research Fab Microelectronics Germany (FMD).

Last year's key accomplishment is a cohesive and efficient operational framework that replaces a multitude of incumbent fragmented solutions. This enables us to overcome the challenges associated with disparate systems and to fulfill our vision of a unified digital processing approach. We can therefore also offer our clients a great quality management tool for the benefit of further process improvements. Our digital processing model reflects the remarkable consistency of our weekly wafer move-

ments. This achievement in an R&D setting, where every wafer is unique and often follows its own process route, highlights our dedication to continuous improvement and operational excellence.

Along with successfully transitioning to digital processing, we have strategically focused on optimizing data collection from processing tools across our fabrication facilities by establishing a comprehensive framework. Every piece of data is collected in a fully contextualized manner, providing a holistic view of our production processes. Prospectively, we aim to collect all data, including time series, and systematically store them in a fully contextualized data lake, thus facilitating seamless accessibility and analysis. This approach enhances our monitoring and processing control abilities and empowers us to derive valuable insights for continuous improvement and innovation in our operations.



⌚ Cluster tool for atomic layer deposition of extremely thin films in FBH's cleanroom-2.  
Clustertool für die Atomlagenabscheidung extrem dünner Schichten in Reinraum-2 des FBH.

## MES – Halbleiterprozessierung im digitalen Zeitalter

Im vergangenen Jahr haben wir mithilfe unseres Manufacturing Execution Systems (MES) erfolgreich auf die digitale Prozessierung umgestellt und so unsere betrieblichen Möglichkeiten entscheidend erweitert. Durch diese strategische Umstellung können wir nun die gleichen Möglichkeiten wie in der industriellen Halbleiterfertigung anbieten – und zugleich die nötige Flexibilität für explorative F&E-Prozesse beibehalten. So stellen wir sicher, dass unsere Fähigkeiten reibungslos in die gemeinsamen Aktivitäten der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) integriert und ausgebaut werden können.

Zu den wichtigsten Fortschritten des letzten Jahres zählt ein kohärenter und effizienter operativer Rahmen, der eine Vielzahl von bestehenden fragmentierten Lösungen ersetzt. Er

hilft uns, die Herausforderungen verschiedener Systeme zu bewältigen und unsere Vision eines vereinheitlichten digitalen Prozesskonzepts zu realisieren. Darüber hinaus bieten wir unseren Kunden damit auch ein hervorragendes Instrument für das Qualitätsmanagement, mit dem sie ihre Prozesse weiter optimieren können. Unser digitales Prozessmodell spiegelt die bemerkenswerte Konsistenz unserer wöchentlichen Waferbewegungen wider. Diese Leistung in einem F&E-Umfeld, in dem jeder Wafer einzigartig ist und oft individuell verarbeitet wird, verdeutlicht unser Engagement für kontinuierliche Verbesserungen und operative Exzellenz.

Nachdem wir unsere Prozesse inzwischen erfolgreich digital verarbeiten, haben wir uns darauf konzentriert, die Datenerfassung von Bearbeitungswerkzeugen in unseren Produktions-

» Durch diese strategische Umstellung können wir nun die gleichen Möglichkeiten wie in der industriellen Halbleiterfertigung anbieten – und zugleich die nötige Flexibilität für explorative F&E-Prozesse beibehalten.



⌚ The MES software allows full connectivity from all devices – from machine control servers to handheld smart devices.  
Mit der MES-Software lassen sich alle Geräte miteinander verbinden – angefangen bei den Servern für die Maschinensteuerung bis hin zu intelligenten Handheld-Geräten.

anlagen zu optimieren. Dazu haben wir einen ganzheitlichen Rahmen geschaffen, mit dem wir alle Daten vollständig in ihrem Kontext erfassen. So erhalten wir einen holistischen Überblick über unsere Produktionsprozesse. Unser Ziel ist es, sämtliche Daten, einschließlich Zeitreihen, zu erfassen und in einem vollständig kontextualisierten Datenpool systematisch zu speichern. Dies ermöglicht es uns, nahtlos darauf zuzugreifen und diese Daten zu analysieren. Durch diesen Ansatz verbessern wir unsere Fähigkeiten zur Überwachung und Verarbeitungskontrolle und gewinnen wertvolle Erkenntnisse, um unsere Abläufe kontinuierlich zu verbessern und die Basis für weitere Innovationen zu schaffen.

## EuMW conference with strong FBH participation

In 2023, the internationally renowned European Microwave Week (EuMW) took place at the Berlin Exhibition Center with strong support from our institute. Andreas Wenzel, who heads the Digital Power Amplifiers Lab at FBH, and Wolfgang Heinrich, Head of the Microwave Department, were involved in the local organization team of the EuMW Steering Committee. Students and doctoral candidates from our institute were on site during the event to support the smooth organizational processes. Olof Bengtsson, Head of the RF Power Lab, offered interested parties hands-on experience in our labs in his short course "Wideband Microwave Measurements of Multi-Port Devices on VNA-Type Measurement Systems". Wolfgang Heinrich chaired a panel session on the European Chips Act.

FBH was represented at the conference with seven talks and one poster. For his contribution to the Tom Brazil Fellowship Award Student Essay Competition, FBH PhD student Paul Tschammer was awarded 2nd place.

The EuMW is the second largest international conference event in the field of microwave technology. With over 1,500 participants, the conference was well attended. More than 300 companies and research institutions presented their products and services at the accompanying exhibition - a new all-time high.



↑ IEEE Technical Skills Educator Award: Jens Hofmann (center) and the ANH team.  
IEEE Technical Skills Educator Award: Jens Hofmann (Mitte) und das ANH-Team.

## EuMW-Konferenz mit starker FBH-Beteiligung



2023 fand die international renommierte European Microwave Week (EuMW) auf dem Berliner Messegelände mit starker Unterstützung aus unserem Institut statt. So engagierten sich Andreas Wenzel, der am FBH das Digital Power Amplifiers Lab leitet, und Wolfgang Heinrich, Leiter des Department Mikrowellentechnik, im lokalen Organisationsteam des EuMW Steering Committees. Studierende und Doktorand\*innen unseres Instituts waren während des Events vor Ort und unterstützen so die reibungslosen organisatorischen Abläufe. Olof Bengtsson, Leiter des RF Power Lab, bot Interessierten in seinem Short Course „Wideband Microwave Measurements of Multi-Port Devices on VNA-Type Measurement Systems“ Hands-on-Erfahrungen in unseren Labs. Wolfgang Heinrich leitete eine Panel Session zum European Chips Act.

Das FBH war mit sieben Vorträgen und einem Poster auf der Konferenz vertreten. Für seinen Beitrag zur Tom Brazil Fellowship Award Student Essay Competition wurde FBH-Doktorand Paul Tschammer zudem mit dem 2. Platz ausgezeichnet. Die EuMW ist das international zweitgrößte Konferenz-Event im Bereich der Mikrowellentechnik. Mit über 1.500 Teilnehmenden war die Konferenz gut besucht. Mehr als 300 Unternehmen und Forschungseinrichtungen präsentierten ihr Angebot auf der begleitenden Ausstellung – ein neues Allzeit-Hoch.

## Career prospects in research and development

Motivated, qualified, and well-trained employees are the backbone of every company. This is especially true for the demanding tasks that knowledge- and research-intensive areas have to offer. Innovations emerge from these areas, advancing not only the discipline itself but also strengthening a country's economic power. Despite the exciting and varied tasks with numerous career opportunities, the shortage of skilled workers is clearly noticeable here as well. Therefore, we actively recruit both scientific and technical talent. Together with the Advanced Training Network for High Technology (ANH Berlin) located at our institute, we actively work on securing skilled workers at all qualification levels.

We support academic talent by comprehensively supervising young researchers, from bachelor's and master's theses to doctoral dissertations. In the technical field, we train apprentices in three professions, with a focus on microtechnologists. The activities of ANH Berlin complement our efforts – more on this on page 19. The 4-member team initiates, organizes, and participates in events related to vocational orientation. It offers diverse opportunities for companies as well as young people in terms of initial, continuous, and advanced training. Among other

things, it has developed a format that prepares career changers for specific tasks in cleanrooms and laboratories.

### Securing skilled workers in the high-tech sector – internationally recognized

In fall 2023, the IEEE Photonics Society honored Jens Hofmann with its "IEEE Technical Skills Educator Award". The submitted application was focused on the newly created initiative of an "Electronics Manufacturing Specialist", which also convinced the jury. Jens Hofmann is Chairman of the Board of proANH e.V., an association that emerged from the activities of ANH Berlin. Both the training network and the association's office are located at FBH and are supported by the institute. The renowned Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) is the world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity.

### Qualification program for career changers

The "Electronics Manufacturing Specialist" is a low-threshold offer for those who, for example, do not want to complete a multi-year training program but already have experience or interest in technical professions. It is also aimed at job seekers who have

already completed a profession but want to change careers. After completion, graduates manufacture and test microelectronic and micro-optical assemblies, for example. Therefore, applicants need a steady hand, must work carefully, and possess fine motor skills. The program lasts five months. It starts with a 14-day preparatory course to determine if one is eligible for the qualification program. This is followed by four months of conveying theoretical specialist knowledge and a one-month internship.

#### Career started with vocational training, progressed to a bachelor professional's degree

Career advancement and opportunities in the research field are also possible through vocational training, up to a bachelor professional's degree – with or without a high school diploma. After

his general qualification for university entrance, Nico Thiele began his training as a microtechnologist at FBH in 2011 and successfully finished in 2014. He was then directly recruited to work in the Process Technology department, where he still works today. This is where he has developed a particular interest in coating and plant technology along with the associated processes. To expand his knowledge, take on more challenging tasks, and assume greater responsibility, Nico Thiele pursued a three-year part-time program to become a "Bachelor Professional of Metal Production and Management" – "certified industrial master in metal".

## Karriereperspektiven in Forschung und Entwicklung

Motivierte, qualifizierte und gut eingearbeitete Mitarbeiter\*innen sind das Rückgrat jedes Unternehmens. Das gilt umso mehr für die anspruchsvollen Tätigkeiten, die wissens- und forschungsintensive Bereiche zu bieten haben. Dabei entstehen Innovationen, die nicht nur die Disziplin selbst voranbringen, sondern auch die Wirtschaftskraft eines Landes stärken. Trotz der spannenden und abwechslungsreichen Aufgaben mit vielfältigen Karrieremöglichkeiten, der Fachkräftemangel ist auch hier deutlich zu spüren. Daher werben wir gleichermaßen um den wissenschaftlichen wie den gewerblich-technischen Nachwuchs. Gemeinsam mit dem bei uns am Institut angesiedelten Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie (ANH Berlin) kümmern wir uns aktiv um die Fachkräftesicherung – auf allen Qualifikationsstufen.

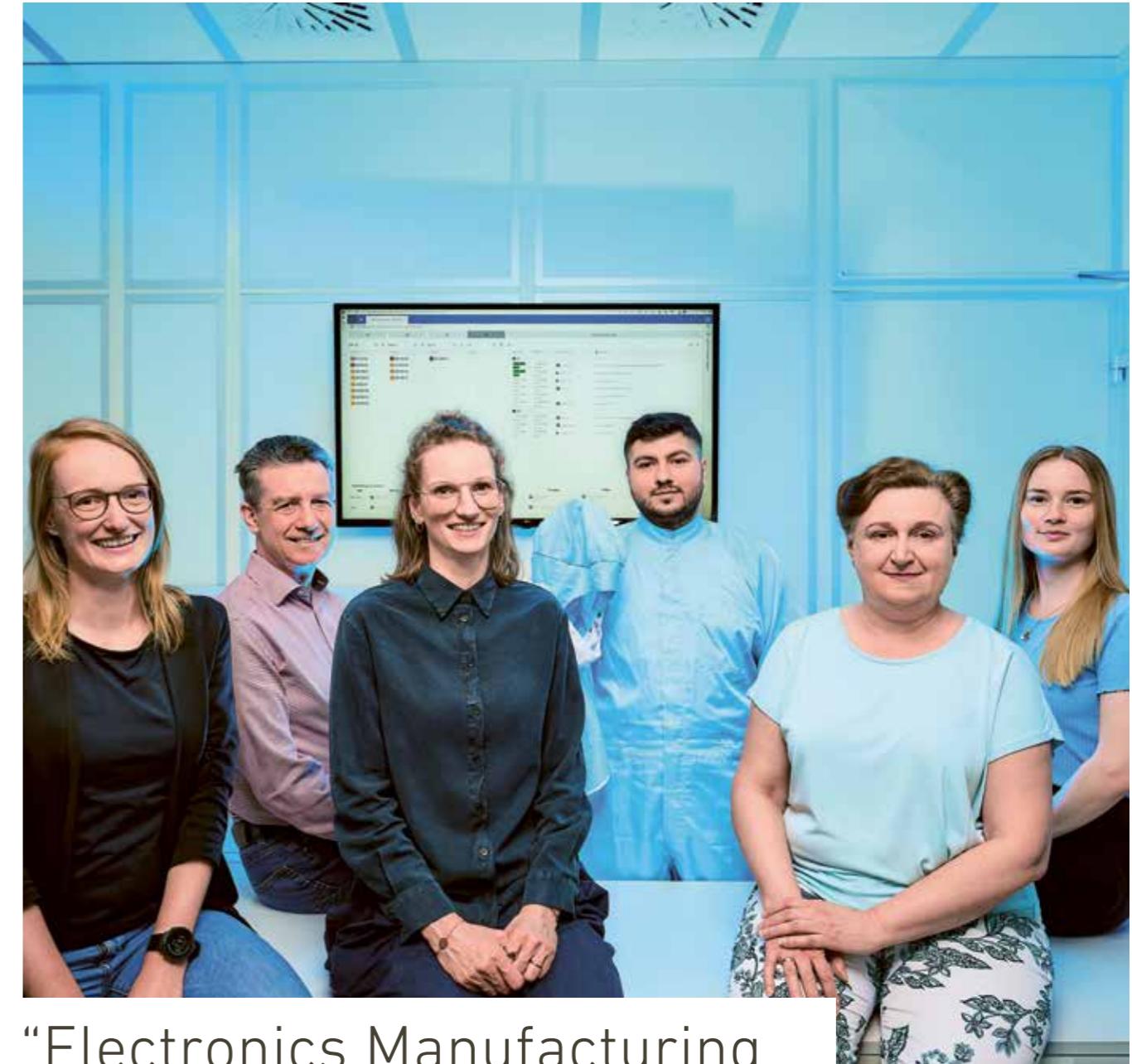
Den akademischen Nachwuchs fördern wir, indem wir junge Forschende umfassend betreuen: von Bachelor- und Masterarbeiten bis zu Promotionen. Gewerblich bilden wir in drei Berufen aus, schwerpunktmäßig Mikrotechnolog\*innen. Die Aktivitäten von ANH Berlin ergänzen unsere Bemühungen – mehr dazu auf S. 19. Das 4-köpfige Team initiiert, organisiert und beteiligt sich unter anderem an Veranstaltungen zur Berufsorientierung. Unternehmen ebenso wie jungen Menschen bietet es vielfältige Angebote rund um Aus-, Fort- und Weiterbildung. Unter anderem hat es ein Format entwickelt, das Quereinsteiger\*innen für spezifische Tätigkeiten im Reinraum und in Laboren fit macht.

#### Fachkräftesicherung im Hightech-Bereich – international gewürdigt

Im Herbst 2023 hat die IEEE Photonics Society ihren „IEEE Technical Skills Educator Award“ an Jens Hofmann verliehen. Im Fokus der Bewerbung stand die neu geschaffene Initiative einer „Fachkraft Elektronikfertigung“, die auch die Jury überzeugte. Jens Hofmann ist Vorstandsvorsitzender von proANH e.V., einem Verein, der aus den Aktivitäten von ANH Berlin hervorgegangen ist. Sowohl das Aus- und Weiterbildungsnetzwerk als auch die Geschäftsstelle des Vereins sind am FBH angesiedelt und werden vom Institut unterstützt. Das renommierte Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ist die weltweit größte technische Fachorganisation, die sich für die Förderung von Technologien zum Wohle der Menschheit einsetzt.

#### Qualifizierung für Quereinsteiger\*innen

Die „Fachkraft Elektronikfertigung“ ist ein niedrigschwelliges Angebot für jene, die beispielsweise keine mehrjährige Ausbildung absolvieren wollen, aber bereits Erfahrungen oder Interesse an technischen Tätigkeiten mitbringen. Es richtet sich auch an Arbeitsuchende, die bereits einen Beruf abgeschlossen haben, sich aber beruflich umorientieren möchten. Nach Abschluss fertigen und prüfen Absolvent\*innen beispielsweise mikroelektronische und mikrooptische Baugruppen. Die Bewerber\*innen brauchen daher eine ruhige Hand, müssen sorgfältig arbeiten und über eine ausgeprägte Feinmotorik verfügen. Das Programm ist auf fünf Monate angelegt. Es startet mit einem 14-tägigen Vorkurs, um festzustellen, ob man für die Qualifizierung überhaupt geeignet ist. Es folgen vier Monate, in denen theoretische Fachkenntnisse vermittelt werden, und ein einmonatiges Betriebspraktikum.



## “Electronics Manufacturing Specialist” – a success story.

Since 2023, 56 participants have successfully completed the 5-month qualification program or are currently in training. One of the graduates is Onur Sahin, who has been working in process technology at FBH since October 2023. Another participant is currently completing his internship with us, and more are expected to follow.

„Fachkraft Elektronikfertigung“ – eine Erfolgsgeschichte: 56 Interessierte haben das 5-monatige Qualifizierungsprogramm seit 2023 erfolgreich abgeschlossen oder befinden sich in der Fortbildung. Einer der Absolventen ist Onur Sahin, der seit Oktober 2023 in der Prozesstechnologie am FBH arbeitet. Ein weiterer Teilnehmender absolviert derzeit bei uns sein Praktikum, weitere sollen folgen.





↑ Nico Thiele standing in front of his work place in the FBH cleanroom.  
Nico Thiele vor seinem Arbeitsplatz im FBH-Reinraum.

» Ein beruflicher Aufstieg und Karriere-möglichkeiten sind im Forschungsbereich auch über eine Ausbildung möglich.

#### Karriere mit einer Ausbildung gestartet, zum Bachelor Professional weitergebildet

Ein beruflicher Aufstieg und Karrieremöglichkeiten sind im Forschungsbereich auch über eine Ausbildung möglich, bis hin zum Bachelor-Professional-Abschluss – ob mit oder ohne Abitur. Nico Thiele hat nach seiner Hochschulreife im Jahr 2011 eine Ausbildung zum Mikrotechnologen am FBH begonnen und 2014 erfolgreich abgeschlossen. Anschließend wurde er direkt übernommen in die Abteilung Prozesstechnologie, wo er bis heute arbeitet. Dort hat es ihm die Beschichtungs- und Anlagentechnik mit den zugehörigen Prozessen beson-

ders angetan. Um sein Wissen zu erweitern, anspruchsvollere Aufgaben und mehr Verantwortung übernehmen zu können, hat sich Nico Thiele drei Jahre lang berufsbegleitend zum „Bachelor Professional of Metal Production and Management“ – „geprüfter Industriemeister Metall“ weitergebildet.

#### frequent on quantum technologies & high-power diode lasers

Our in-house publication *frequent* bundles results from our R&D activities on specific topics. These two issues were published in 2023 – click here to check them out:



#### frequent zu Quantentechnologien & Hochleistungs-Diodenlasern

In unserer Hauspublikation *frequent* bündeln wir Ergebnisse aus unseren F&E-Aktivitäten zu spezifischen Themenschwerpunkten. 2023 sind diese beiden Ausgaben erschienen – hier zum Nachlesen:

# Photonics

## Photonik

Within our photonics research area, we cover a broad range of diode laser and light-emitting diode (LED) developments that are tailored precisely to fit individual requirements. The portfolio ranges from research into fundamental performance limits to the development of ready-to-use modules, prototypes, and systems. It comprises gallium-arsenide-based diode lasers and modules, emitting from the near-infrared to the visible spectral range.

We also realize modules that use these devices and convert their emission into the ultraviolet (UV) spectral range. Moreover, we develop laser diodes and LEDs based on gallium nitride with direct emission in the UV and violet spectral range. We currently focus on the following topics:

> **High-power diode lasers** – broad area lasers, laser bars, and stacks optimized for high output powers. They are used as pump lasers as well as for direct material processing.

> **Laser modules** – we integrate optics for beam shaping, external resonators, electronics, and crystals for frequency doubling into the miniaturized laser modules. Also, subsequent coupling into optical fibers is possible. These light sources are used in applications including non-contact measurement technology and healthcare.

> **Laser sensors** – diode lasers customized for applications in sensors and analytics. They are employed, e.g., in compact, portable laser measurement systems, enabling to measure Raman spectra even in real-world applications. Such systems have been successfully applied in hospitals and on agricultural fields.

> **GaN optoelectronics** – we develop diode lasers for the violet and UV LEDs for the UVB and UVC spectral range. The LEDs are used in applications such as disinfection (surfaces & skin), sensing, and plant irradiation.

Our Optoelectronics Department provides much of the required basic know-how for these developments: In particular, it designs, realizes, and characterizes the corresponding GaAs-based diode lasers in co-operation with the topically focused labs.

In unserem Forschungsbereich Photonik decken wir ein breites Spektrum an Entwicklungen zu Diodenlasern und Leuchtdioden (LEDs) ab, die auf die jeweilige Anforderung zugeschnitten werden. Das Portfolio reicht von der Bearbeitung grundlagenorientierter Fragestellungen bis hin zur Entwicklung von einsatzfähigen Diodenlasermodulen, Prototypen und Systemen. Es umfasst Galliumarsenid-basierte Diodenlaser und -Module, die vom infraroten bis zum sichtbaren Spektralbereich emittieren.

Wir realisieren zudem Module, die diese Bauelemente nutzen und deren Emission in den ultravioletten (UV) Spektralbereich umwandeln. Darüber hinaus entwickeln wir Laserdioden und LEDs auf Galliumnitrid-Basis mit direkter Emission im violetten und UV-Spektralbereich. Aktuell setzen wir die folgenden Schwerpunkte:

> **Hochleistungs-Diodenlaser** – Breitstreifenlaser, Laserbarren und Stacks, optimiert auf hohe Ausgangsleistungen. Sie werden u. a. als Pumplaser und für die direkte Materialbearbeitung genutzt.

> **Lasermodule** – in die miniaturisierten Module integrieren wir Optiken zur Strahlformung, externe Resonatoren, Elektronik und frequenzverdoppelnde Kristalle mit höchster Präzision. Auch die anschließende Kopplung in Glasfasern ist möglich. Diese Lichtquellen werden u.a. in der berührungslosen Messtechnik und der Medizin eingesetzt.

> **Lasersensorik** – Diodenlaser, die speziell auf Anwendungen in der Sensorik und der Analytik zugeschnitten sind. Sie kommen u. a. in kompakten, portablen Lasermesssystemen zum Einsatz, die Messungen von Raman-Spektren auch unter realen Umweltbedingungen ermöglichen. Diese Systeme wurden in Kliniken und auf landwirtschaftlichen Feldern erfolgreich eingesetzt.

> **GaN-Optoelektronik** – wir entwickeln Diodenlaser für den violetten und UV-Leuchtdioden für den UVB- und UVC-Spektralbereich. Die LEDs eignen sich u. a. für die Desinfektion (Oberflächen & Haut), die Sensorik und die Pflanzenbestrahlung.

Unser Department Optoelektronik stellt einen Großteil des erforderlichen grundlegenden Know-hows zur Verfügung: Insbesondere entwirft, realisiert und charakterisiert es die zugehörigen GaAs-basierten Diodenlaser in Zusammenarbeit mit den thematisch ausgerichteten Labs.

# The theory behind mode-hop-free tunable high-power DFB lasers

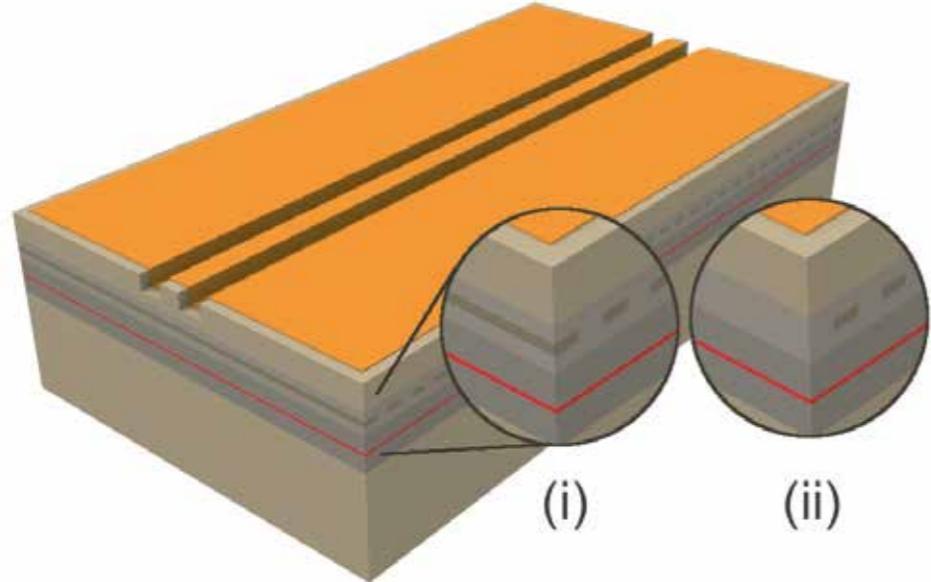


Fig. 1. DFB laser model with close-up (i) of a facet. The position of the facet relative to the Bragg grating varies randomly between different devices due to processing. Close-up (ii) illustrates an alternative facet position shifted by half a grating period. This leads to a variable phase of the back reflected field at the highly reflective rear facet and influences the tuning behavior of the lasers.

Compact and robust single frequency high-power GaAs-based diode lasers are enabling components across various industrial applications in sensing, spectroscopy, and quantum technology. These applications require laser sources that are both widely tunable and highly coherent. Distributed feedback (DFB) lasers with monolithically integrated Bragg gratings hold the promise of wavelength tuning without mode hops over a wide range of operating conditions while maintaining a low spectral linewidth. The tuning behavior depends on the position of the rear facet with respect to the Bragg grating, which determines the reflection phase. However, the cleaving technology of laser chips from the wafer is not precise enough to intentionally adjust the reflection phase which, therefore, is random for nominally identical devices.

We investigated the spectral behavior of high-power DFB lasers using numerical simulations that consider the complete range of possible reflection phase conditions. As a result, we found

the mechanism for mode hops, which appear in some of those devices above threshold [1]. These lasers exhibit a strongly varying intensity distribution in the cavity with a maximum at the anti-reflection coated front facet and a minimum near the high-reflection coated rear facet, influenced by the reflection phase. The associated spatial variations of the carrier density and temperature modify the local refractive index. For some critical values of the reflection phase the refractive index at the rear facet is reduced with increasing injection current, resulting in longitudinal mode hops from the lower to the higher wavelength side of the stop band of the Bragg grating. In contrast to prior studies, these investigations not only allow to estimate the probability of devices showing mode hops above threshold but also reveal a specific range of critical reflection phase conditions.

The simulations reproduce the experimentally observed spectral behavior of the real devices. Besides better understanding such lasers, the findings can be used to identify devices showing

mode hops above laser threshold and widely tunable lasers already by determining the reflection phase, respectively. The reflection phase can, e.g., be extracted from measurements of the spectra of the amplified spontaneous emission below threshold already at an early stage of the value chain. Additionally, the limited range of identified critical reflection phases motivates future design modifications. These modifications include integrating actively tunable phase sections at the rear facet to overcome limitations of a process-dependent randomly distributed reflection phase. Moreover, design optimizations aim to narrow down the range of critical reflection phases even further.

Weit durchstimmbare Diodenlaser mit hoher optischer Ausgangsleistung und schmaler spektraler Linienbreite werden für zahlreiche klassische und quantentechnologische Anwendungen in der Messtechnik benötigt. Distributed-Feedback (DFB)-Laser eignen sich dafür ideal, da sich ihre Wellenlänge über den Injektionsstrom oder die Temperatur über einen großen Bereich variieren lässt. Allerdings kann es dabei zu ungewollten Modensprüngen kommen. Entscheidend ist hierbei die nicht beeinflussbare Position der hochverspiegelten Rückfacette zum integrierten Bragg-Gitter. Diese lässt sich durch eine effektive Reflexionsphase an der Rückfacette ausdrücken.

## Publication

- [1] M. Reggentin, J.-P. Koester, H. Wenzel, A. Kninge, "Spectral behavior of high-power distributed feedback lasers", Opt. Quant. Electron., vol. 55, no. 5, art. 459, <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04747-3>

Wir haben das spektrale Verhalten dieser Laser oberhalb der Laserschwelle umfassend simuliert. Dabei konnten wir den Mechanismus identifizieren, der zu Modensprüngen in Abhängigkeit von der effektiven Reflexionsphase an der Rückfacette führt sobald sich der Injektionsstrom ändert. Aus diesem besseren Verständnis der Laserstrukturen ergeben sich neue Ansätze für weitere Optimierungen. Darüber hinaus lassen sich modensprungfrei durchstimmbare Laser durch geeignete Messungen bereits an einem frühen Punkt der Wertschöpfungskette gezielt identifizieren.

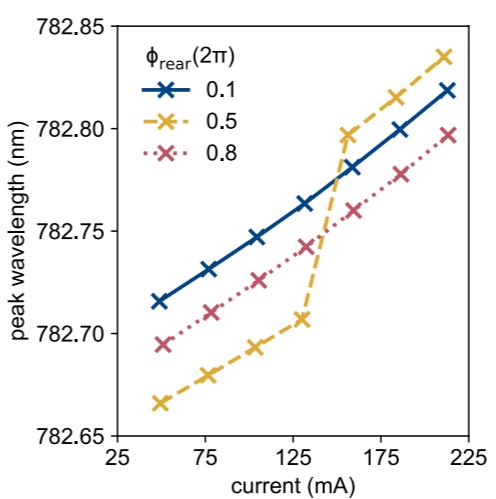


Fig. 2. Wavelength tuning of high-power DFB lasers by current for different values of the reflection phase at the rear facet, showing a mode hop for one device (dashed line) and continuous tuning for the others.

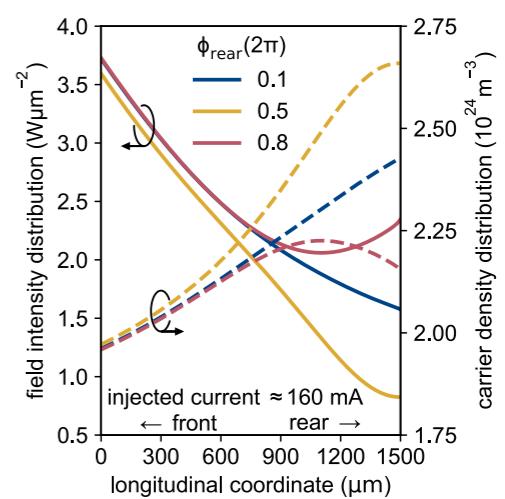


Fig. 3. Longitudinal field intensity and carrier density distribution for devices shown in Fig. 2.

# 100 W distributed feedback laser with multiple epitaxially stacked active regions and tunnel junctions for LiDAR applications



Fig. 1. FBH's nanosecond pulsed laser driver integrated with a soldered and bonded 1 mm long DFB BA laser for LiDAR applications.

Diode lasers generating short optical pulses in the nanosecond range with high optical pulse power are highly desirable for various applications. The compact, reliable, and energy-efficient light sources are particularly required for LiDAR systems. In autonomous driving, for example, they are used to reliably detect objects at long distances. However, operating such systems efficiently requires a higher pulse power and a lower pulse current amplitude than is currently available. This can be achieved by epitaxial stacking of several active regions, separated by tunnel junctions. Although this approach increases the voltage, it reduces the required current. By using a high-order vertical mode, the absorption in the highly doped tunnel junctions can be minimized, ensuring a high slope efficiency. Moreover, the required narrow spectral linewidth is preferably realized using a distributed feedback (DFB) laser rather than a distributed Bragg reflector (DBR) laser. This is due to the fact that its Bragg grating extends over the entire length of the electrically driven cavity. As a result, the chip area is smaller and the laser has potentially lower production costs. Finally, achieving high peak powers also requires specialized electronics capable of managing correspondingly high currents.

For the first time, we have successfully fabricated DFB broad-area (BA) lasers at the FBH that contain three InGaAs active regions and two GaAs tunnel junctions in a common optical waveguide. The tunnel junctions are placed in the nodes and antinodes of the third vertical mode, respectively. A surface Bragg grating with a period of 5513 nm is used to realize the distributed feedback. The lasers were soldered p-side down on CuW submounts and integrated into in-house-developed double-

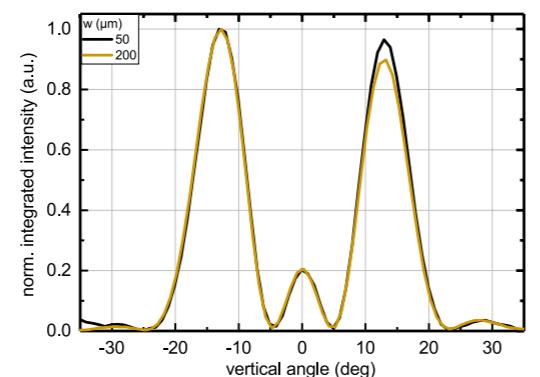


Fig. 3. Vertical far-field intensity distributions of DFB BA lasers with stripe widths of 50  $\mu\text{m}$  and 200  $\mu\text{m}$ .

Diodenlaser, die optische Pulse im Nanosekundenbereich mit hoher optischer Pulseleistung erzeugen, sind Schlüsselkomponenten für vielfältige Anwendungen. Die kompakten, zuverlässigen und energieeffizienten Lichtquellen werden insbesondere in LiDAR-Systemen benötigt. Beim autonomen Fahren beispielsweise werden sie eingesetzt, um Objekte auf große Entfernen zuverlässig zu erkennen. Damit solche Systeme effizient betrieben werden können, müssen jedoch die derzeit verfügbare Pulseleistung weiter erhöht und die erforderliche Pulsstromamplitude reduziert werden. Dies lässt sich durch epitaktisches Stapeln mehrerer aktiver Zonen, die durch Tunnelübergänge getrennt sind, erreichen.

Am FBH haben wir nun erstmals einen wellenlängenstabilisierten DFB-Breitstreifenlaser mit drei aktiven Zonen und zwei Tunnelübergängen demonstriert – inklusive speziell entwickelter Treiberschaltungen. Damit konnten wir Nanosekundenpulse erzeugen, die optische Pulseleistungen von über 100 W bei einem Pulsstrom von 63 A mit einem schmalen optischen Spektrum um 900 nm liefern.

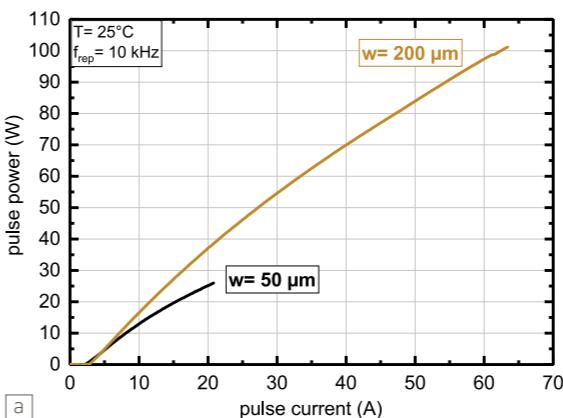
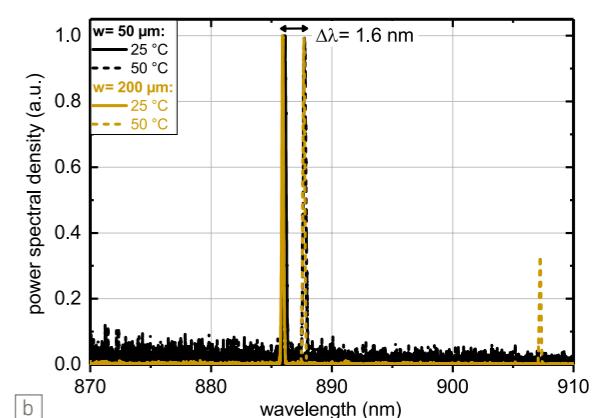


Fig. 2. (a) Light-current characteristics of DFB BA lasers with stripe widths of 50  $\mu\text{m}$  and 200  $\mu\text{m}$  at 10 ns pulse width. (b) Time-averaged optical spectra.



sided electronic drivers, see Fig. 1. We have compared DFB BA lasers with a cavity length of 1 mm and stripe widths of 50  $\mu\text{m}$  and 200  $\mu\text{m}$  in terms of their electro-optical performance (Fig. 2). The laser with a 200  $\mu\text{m}$  stripe width achieved an optical pulse power of 100 W in 10 ns long pulses at an injection current of 63 A. In contrast, the 50  $\mu\text{m}$  wide laser reached a pulse power of 26 W. It could only be operated up to a pulse current of 21 A, indicating that the maximum achievable pulse power increases with stripe width.

In comparison, a 1 mm long DFB BA laser with three active regions and a stripe width of 200  $\mu\text{m}$  exhibited a pulse power that was a factor of 3.5 higher than a state-of-the-art 6 mm long DBR BA laser with a single active region and a stripe width of 50  $\mu\text{m}$ . The narrow optical spectrum of the novel lasers is centered at around 886 nm at 25 °C, revealing the effect of the Bragg grating (Fig. 2). For the 50  $\mu\text{m}$  laser, the full width at half maximum is less than 0.24 nm and 0.19 nm for the 200  $\mu\text{m}$  laser. The thermal tuning rate of the wavelength is only 64 pm/K. Fig. 3 shows the vertical far-field (FF) intensity profiles with three intensity peaks, confirming that the third vertical mode is amplified. The FF angle of the fast-axis (second-moment width) is 54 ° for both lasers. These results demonstrate the new possi-

bilities that are opening up for the application of DFB lasers in LiDAR systems. This work was partly funded by Research Fab Microelectronics Germany (FMD) under ref. 16FMD02 and by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), grant 13N15566 as part of WiVoPro.

## Publications

- N. Ammour, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maaßdorf, H. Wenzel, A. Knigge, "Wavelength-stabilized ns-pulsed 2.2 kW diode laser bar with multiple active regions and tunnel junctions", Electron. Lett. 59, 1-3, <https://doi.org/10.1049/ell2.12680>
- H. Christopher, N. Ammour, A. Maaßdorf, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, C. Zink, M. Ekerai, H. Wenzel, A. Knigge, "2 kW Pulse Power from Internal Wavelength Stabilized Diode Laser Bar for LiDAR Applications", Proc. SPIE 12403, 1240302, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-presentations/12403/1240302/2-kw-pulse-power-from-internal-wavelength-stabilized-diode-laser/10.1117/12.2649630>
- N. Ammour, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maaßdorf, H. Wenzel, A. Knigge, G. Tränkle, "Distributed feedback broad area lasers with multiple epitaxially stacked active regions and tunnel junctions", Optics Letters 48, 6520, <https://doi.org/10.1364/OL.510521>

# Expanded research studies in diode physics and engineering, seeking ever-higher-power diode lasers

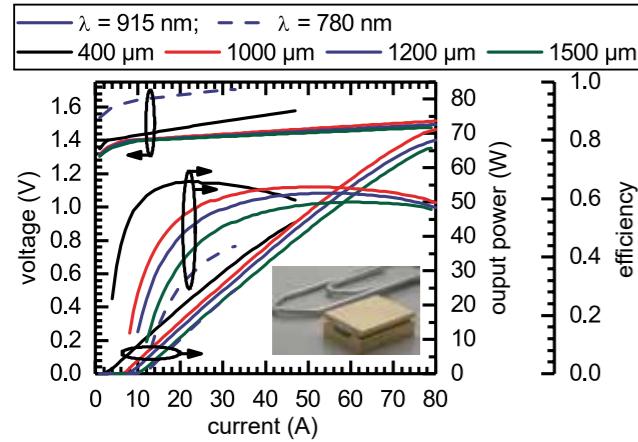


Fig. 1. The LIV and conversion efficiency  $\eta_E$  of wide-aperture single emitters with stripe widths of 400, 1000, 1200, and 1500  $\mu\text{m}$  for 915 nm and 1200  $\mu\text{m}$  for 780 nm at 25°C in CW operation (sandwich-mounting as inset).

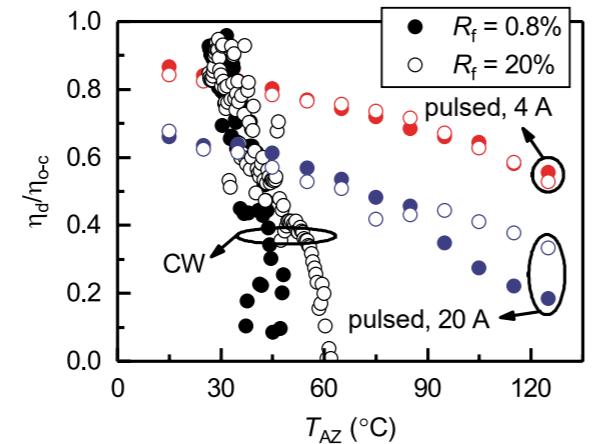


Fig. 2. Estimated internal efficiency (external differential efficiency  $\eta_d$  normalized to out-coupling efficiency  $\eta_{0c}$  at low current and 20°C) as a function of the average active zone temperature for pulsed currents of 4 A and 20 A, and for CW testing in the 0–20 A range.

High-power GaAs-based diode lasers are the most efficient light sources, either used directly or as pumps. Hence, they enable many applications ranging from material processing through to particle acceleration and nuclear fusion. Efforts are ongoing at the FBH to overcome the limits to optical power in diode lasers, thereby benefiting existing applications and enabling new ones. In 2023, our efforts were reflected in several invited talks world-wide. In particular, recent developments enabled the continuous wave (CW) power per single emitter to be scaled to new heights by exploiting large aperture devices. In parallel, collaboration with academic partners revealed that local temperature differences within the chip limit the power in diodes with fixed aperture size, and showed the path to further improvements.

First, we have jointly investigated with industrial partners diode lasers featuring large apertures for scaling CW power per single emitter. These high-power devices are used directly in material processing. Enlarging the aperture lowers the temperature, due to the wider cooling area, and increases power. However, it can deteriorate the beam quality. In 2023, we fabricated diode lasers

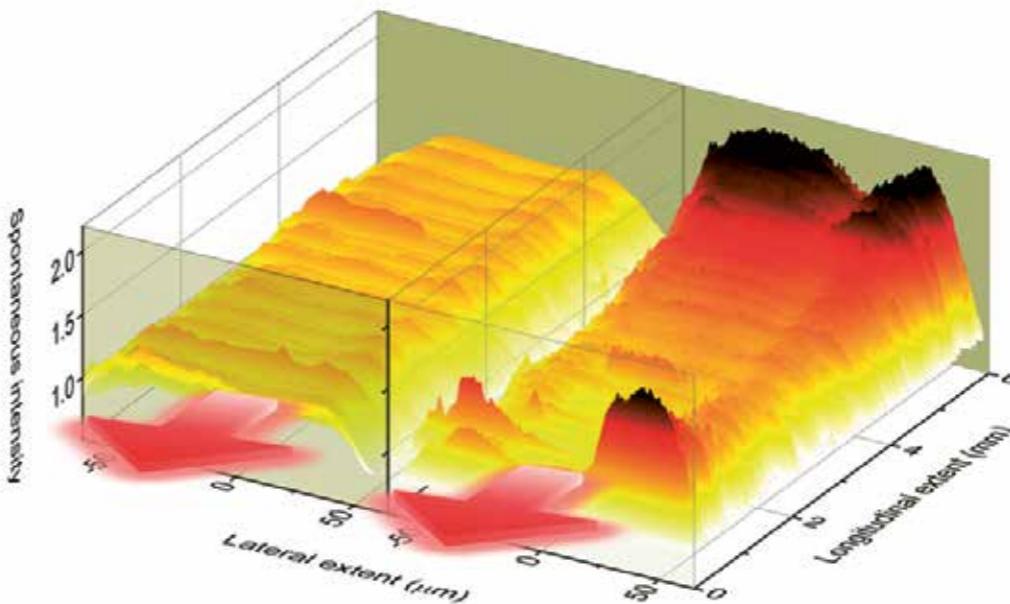
with wavelengths of 915 nm and 780 nm, using efficient epitaxial layer designs. The lasers had wide stripes (400...1500  $\mu\text{m}$ ), and the contact was sub-structured to maintain a narrow far field. We mounted the single emitters in a compact  $6 \times 8 \text{ mm}^2$  assembly for efficient double-side cooling. As shown in Fig. 1, we obtained powers of 71 W at 59% (65% peak) conversion efficiency for the 915 nm lasers and 25 W at 44% conversion efficiency for 780 nm in CW operation at 25°C, using 1000  $\mu\text{m}$  and 1200  $\mu\text{m}$  stripe widths, respectively. This corresponds to new best values in these wavelength ranges. For all devices, maximum output powers are limited by the cooling capability of the test station.

Second, in collaborative research with the University of Glasgow, we performed experimental studies of power limits due to longitudinal spatial hole burning (LSHB) and lateral carrier accumulation (LCA). LSHB and LCA arise in CW mode due to the asymmetric facet coatings needed in conventional diode lasers (high at back, low at front) to deliver light from the front facet. Non-uniform photon density leads to higher carrier density at the back facet (LSHB) and higher temperature at the front facet, which causes accumulation and loss of carriers at the front

stripe edges (LCA). In 2023, studies of spontaneous emission through a window in the device's n-side revealed that those with 20% front facets rather than conventional 0.8% have a flattened carrier density profile, as can be seen in Fig. 3. Hence, they reach a more uniform in-chip temperature and higher CW currents before saturating. We quantified the benefit by estimating the internal efficiency of converting carriers to photons. This is plotted in Fig. 2 as a function of average temperature of the diode laser, as obtained from the lasing wavelength. In short-pulse operation with uniform temperature, the internal efficiency is similar at low bias for both devices. However, the internal efficiency is reduced at a high bias of 20 A for the devices with 0.8% reflectivity compared to devices with 20% front facet due to losses from LSHB. In CW tests, the internal efficiency falls extremely rapidly with average temperature. However, the internal efficiency for devices with 20% front facets drops more slowly, on account of their more uniform temperature and hence reduced LCA. Overall, non-uniform temperatures in CW devices due to spatial hole burning is revealed as a major limit to output power, and ongoing studies seek to flatten the temperature profiles.

Funding for the 915 nm wide-aperture laser development by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the European Union Eurostars project BRISCL, contract number: 01QE2103D, is gratefully acknowledged; as is the funding for the 780 nm laser development provided within the IBB ProFIT project SAMBA, co-financed by the European Union (ERDF) under contract number 10193579.

Fig. 3. Measured carrier density profiles (spontaneous emission power) at high bias (approx. 10 A) from high-power diode lasers at 970 nm with varied front facet reflectivity. Left: high reflectivity for suppressed spatial hole burning (20%), right: baseline reflectivity (0.8%).



Galliumarsenid-basierte Hochleistungs-Diodenlaser sind für die industrielle Materialbearbeitung unverzichtbar und hochinteressant für neuartige Anwendungen wie etwa die Kernfusion. Am FBH führen wir gemeinsam mit internationalen Partnern Studien durch, um die optische Leistung zu erhöhen und derartige Anwendungen zu unterstützen. So konnten wir sehr hohe Leistungen aus Einzelemittern mit sehr breiten Streifen im Dauerstrich-Betrieb erzielen. Ein Diodenlaser mit 915 nm Wellenlänge liefert beispielsweise bis zu 71 Watt Ausgangsleistung mit 65% Konversionseffizienz aus einem 1000  $\mu\text{m}$  breiten Einzelemitter. In einer weiteren Untersuchung, haben wir die Reflektivität der Frontfacette variiert. Dabei zeigte sich, dass lokale Temperaturunterschiede wegen des longitudinalen räumlichen Lochbrennens (LSHB) und der lateralen Ladungsträgerakkumulation (LCA) die optische Leistung entscheidend begrenzen.

## Publications

P. Crump, "Limits to power in GaAs-based broad area lasers", European Semiconductor Laser Workshop (ESLW), Glasgow, U.K. (2023).

P. Crump and G. Tränkle, "Power scaling in GaAs-based semiconductor lasers", 5th Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT), Yokohama, Japan (2023).

P. Crump, "Maximizing efficiency, power and beam quality in GaAs-based broad area edge emitters, as an enabler for emerging high-power applications", 5th IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP), Dhaka, Bangladesh (2023).

S. Arslan, H. Wenzel, J. Fricke, A. Thies, A. Ginolas, B. Eppich, G. Tränkle, P. Crump, "Experimental and theoretical studies into longitudinal spatial hole burning as a power limit in high-power diode lasers at 975 nm", Appl. Phys. Lett. 122, 261101 (2023).

B. King, S. Arslan, A. Boni, P.S. Basler, C. Zink, P. Della Casa, D. Martin, A. Thies, A. Knigge, P. Crump, "GaAs-based wide-aperture single emitters with 68 W output power at 6% efficiency realized using a periodic buried-regrown-implant-structure", Proc. CLEO/Europe-EQE, Munich, Germany, paper cb-11-1 (2023).

S.K. Khamari, S. Arslan, C. Zink, S.J. Sweeney, P. Crump, "Carrier density non-pinning at stripe-edges and widened lateral far field due to longitudinal temperature variation in broad-area high power diode lasers", Appl. Phys. Lett. 122, 211101, (2023).

S. Arslan, H. Wenzel, J. Fricke, A. Thies, A. Ginolas, B. Eppich, G. Tränkle, P. Crump, "Experimental and theoretical studies into longitudinal spatial hole burning as a power limit in high-power diode lasers at 975 nm", Appl. Phys. Lett. 122, 261101 (2023).

# Improving quality and consistency in GaN-based laser development by introducing a modern multi-wafer epitaxy tool

The FBH is dedicated to the advancement of GaN-based laser diodes (LDs) emitting in the blue/violet spectral range. These devices can be used for optical projection, sensing, and in quantum technology. Our current focus is on developing particularly reliable devices with a long lifetime, a crucial requirement for space applications. Here, LDs can be incorporated in external cavity setups for rubidium spectroscopy. These setups are one of the building blocks for precise satellite-based positioning systems.

To increase the quality and speed of GaN-based laser development at FBH, we initiated the transition from a horizontal single-wafer metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) tool to a mod-

ern multi-wafer close coupled showerhead reactor (Fig. 1). This new tool can simultaneously overgrow six 2" GaN substrates. The reactor enables to develop a chip process technology that takes advantage of the fact that wafers not only have a nominally, but actually identical epitaxial structure.

With the previously used single-wafer tool, for example, the development of low-resistive p-contacts was slow and unable to achieve ideal ohmic characteristics. Even optimized LDs with low threshold currents had p-contacts with partially rectifying characteristics and a contact resistivity of about  $2 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$  at a current density of  $10 \text{A/cm}^2$ , resulting in LD operation voltages of about 7.5 V at 100 mA. Now, LDs with heterostructures

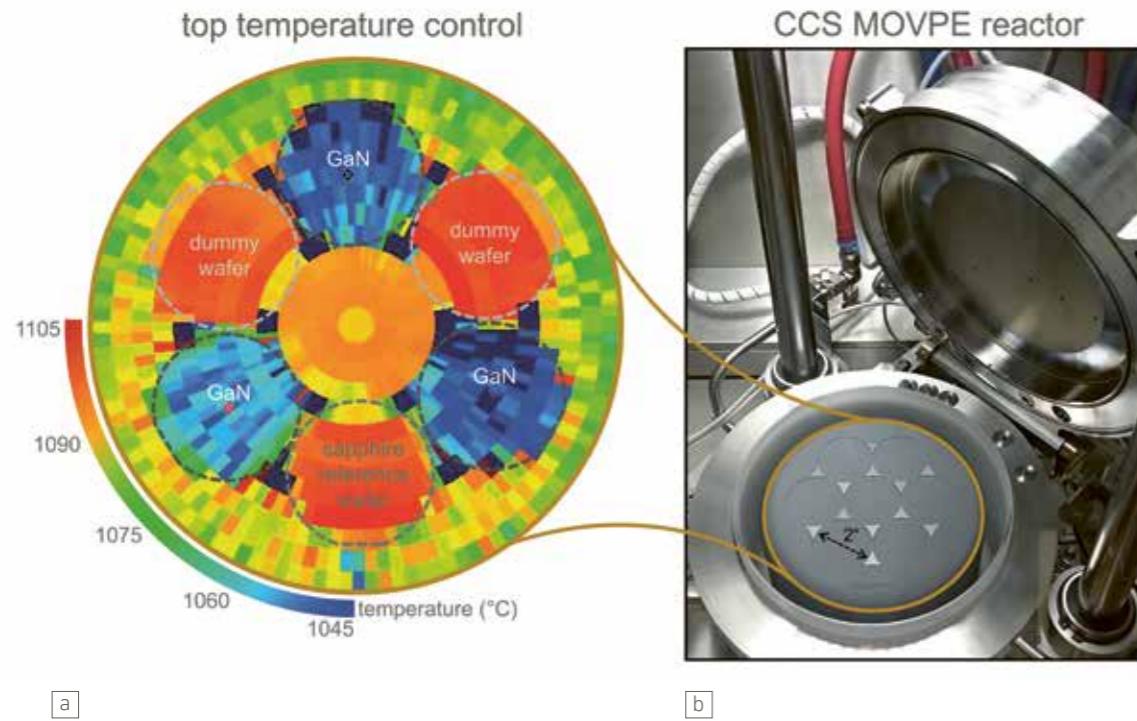


Fig. 1. (a) Pocket temperature distribution profile in false colors and (b) picture of the open reactor chamber of the multi-wafer close coupled showerhead system capable of overgrowing six 2" substrates.

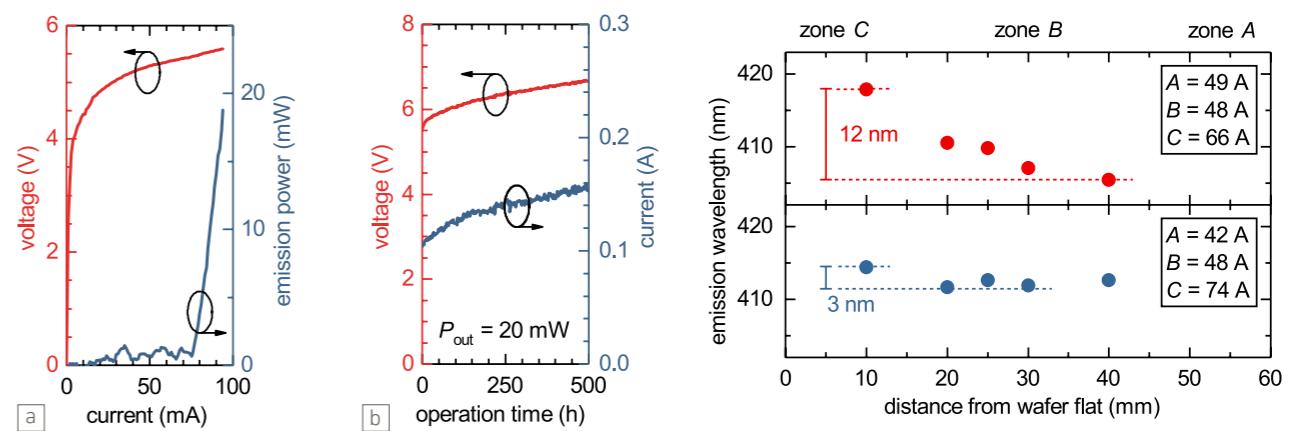


Fig. 2. (a) Emission power-voltage-current-characteristic of a mounted LD (unaged state) as well as (b) voltage and current as a function of operation time, keeping 20 mW constant output power.

grown in the new multi-wafer system feature p-contacts with almost ohmic characteristics, one order of magnitude lower contact resistivities of  $3 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$  at  $10 \text{A/cm}^2$  as well as an operation voltage of about 5.5V at 100 mA and 20 mW LD output power (Fig. 2a). Moreover, their life times for 20 mW constant output power is at least several hundred hours, with aging experiments still ongoing (Fig. 2b).

Additionally, the multi-wafer tool allows to precisely adjust the temperature profile across the wafer to improve growth uniformity. This is achieved with a tungsten heater below the susceptor, which is divided into three heater zones. By controlling the current supplied to these three zones, the surface temperature profile of the susceptor can be adjusted. The surface temperature of the susceptor is measured by photodiodes from the top at several points. Such a temperature profile is shown in Fig. 1 for a growth run with three GaN wafers in the six susceptor pockets. The pockets with the GaN wafers exhibit a lower temperature than the pockets with the sapphire wafers due to the different thermal conductivities of the materials.

When growing, e.g., LD heterostructures with multiple InGaN quantum wells, the surface temperature drastically influences the emission wavelength of the device due to the temperature dependent indium incorporation. Therefore, a precise control of the temperature uniformity will result in a low wavelength shift across the wafer. Fig. 3 shows the effect of adjusted heater zones and thus of the distribution of the spontaneous emission wavelength of an InGaN-based LD wafer. By lowering the current supplied to zone A (center of susceptor) and increasing the current supplied to zone C (edge of susceptor), the wavelength shift can be reduced from  $\sim 12 \text{ nm}$  to  $\sim 3 \text{ nm}$ . The possibility to adjust the heater zones separately combined with measuring the surface temperature in situ is a huge advantage for realizing GaN laser diodes with high yields whose target wavelength is precisely tailored to the application.

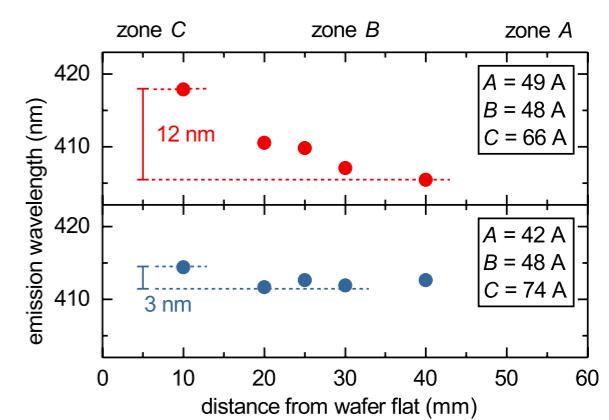


Fig. 3. Distribution of peak wavelengths of spontaneous emission across the wafer (top) before and (bottom) after adjusting the current supply to heater zone A and C.

Supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action in the framework of the project "Development of a laser source for a rubidium based optical atomic clock (LARUS) (contract 50WM2179) and in the frame of Research Fab Microelectronics Germany (FMD), reference 16FMD02.

GaN-basierte Laserdioden (LDs), die im blau/violetten Spektralbereich emittieren, können zur optischen Projektion, zur Sensorik und in der Quantentechnologie genutzt werden. Insbesondere wenn sie im Weltraum eingesetzt werden, müssen sie eine hohe Zuverlässigkeit bieten. Um diese zu erreichen und die Entwicklung am FBH zu beschleunigen, haben wir von einer Einzelwafer-2"- zu einer 6 × 2"-Multiwafer-Epitaxiemaschine gewechselt.

Dadurch ist es uns gelungen, Pd/Pt-Kontakte auf GaN:Mg mit nahezu ohmscher Charakteristik zu erreichen und den Kontaktwiderstand auf  $3 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$  zu reduzieren. Die damit aufgebauten LDs liefern eine Betriebsspannung von etwa 5,5V bei 100 mA und 20 mW Ausgangsleistung. Die LDs erreichen bereits eine Lebensdauer von mehreren hundert Stunden – die Messungen laufen weiter. Das Design des Heizers der neuen Epitaxieanlage ermöglicht es, das Temperaturprofil über den Wafer präzise einzustellen. Dadurch können wir den temperaturabhängigen Indium-Einbau besser kontrollieren und eine Wellenlängenhomogenität von  $\sim 3 \text{ nm}$  über den Wafer erreichen.

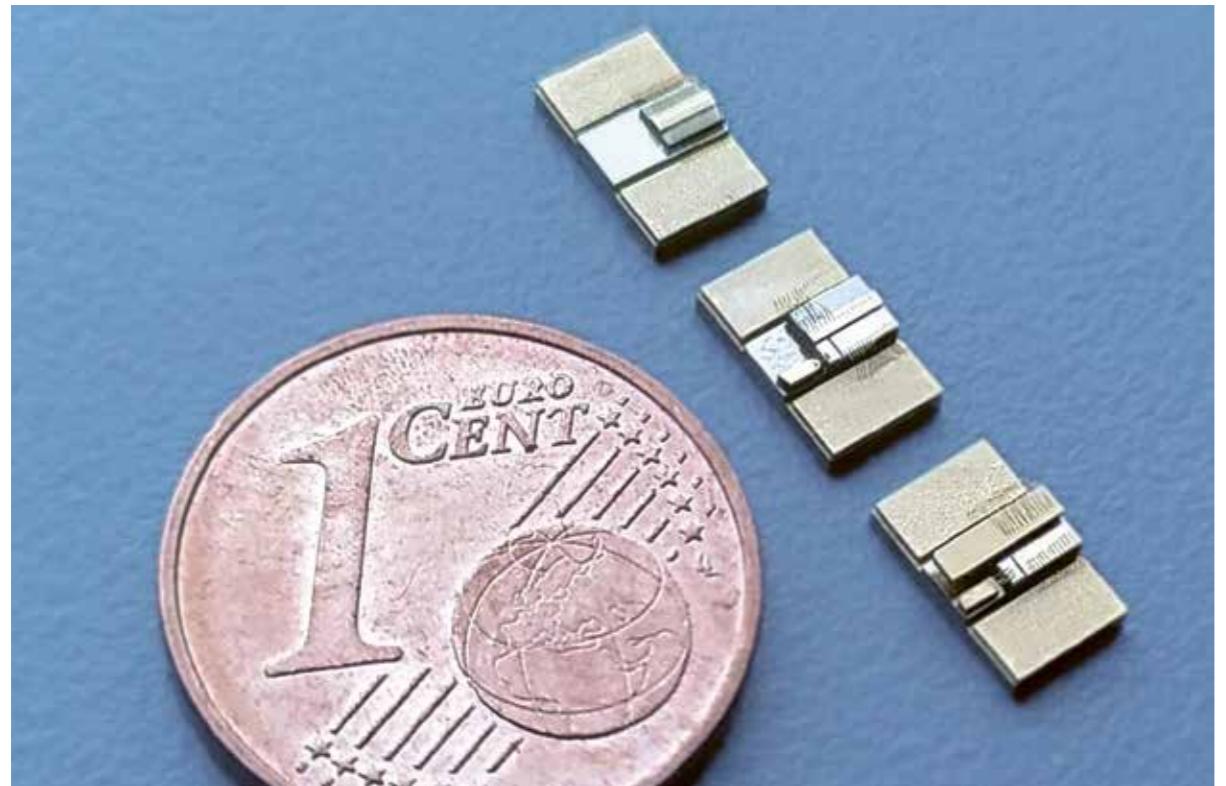


Fig. 1. DBR tapered lasers on screening submounts for testing prior to module integration.

## Ready for systems integration: spectrally stabilized high-power high-brightness diode lasers for compact non-linear optics modules

Miniaturization is the key to many photonics applications. Diode lasers are ideal due to their inherently small size. However, currently not all wavelengths are directly accessible with diode lasers. For these, non-linear optics paired with diode lasers offers a way out to generate the desired laser radiation while maintaining a high level of miniaturization. For non-linear optics to be efficient, the employed diode lasers require to emit high spectral radiance, which means simultaneously high power, good beam quality, and small spectral linewidth. To achieve this goal, we have developed tapered diode lasers with internal Bragg gratings at wavelengths of 660 nm and 1180 nm in 2023.

The lasers at 660 nm are designed to pump a non-linear optical process called spontaneous parametric down conversion (SPDC). The SPDC produces near-infrared photons near 800 nm and mid-infrared photons near 3.7 μm. Both photon types are quantum-mechanically entangled. This entanglement can then be

used to perform optical measurements in the mid-infrared spectral range while only detecting the near-infrared photons with conventional silicon-based detectors. A variation of the newly developed laser chips used to pump the SPDC were mounted on screening submounts for characterization prior to module integration (see Fig. 2). The best designs feature an optical output power of up to 1 W at 660 nm [1]. The emission is to a large degree spectrally and spatially single mode, ensuring a high spectral radiance. A life time of more than 3,000 h was demonstrated.

Our diode lasers emitting at 1180 nm were developed for second harmonic generation in a non-linear crystal to generate laser radiation at a wavelength of 590 nm. This yellow-orange wavelength is interesting due to the sodium line, which is used as a standard for many conventional optics applications. These range from the calibration of sugar-content measurement in liquids

to laser guide stars for terrestrial astronomy. So far, this wavelength cannot be addressed directly with semiconductor lasers. Thus, high spectral radiance lasers at 1180 nm were developed that emit up to 9 W [2]. This is more than a factor of 2 greater than previously reported. The new lasers feature predominantly spectrally single-mode emission and have a spatial fundamental mode content of more than 75 %. Operated at 7 W, they showed no failure during 3,000 h operation time.

Both lasers at 660 nm and at 1180 nm are ready for integration into small-sized laser modules to power their respective nonlinear process (see Fig. 2). This will lead to a new class of miniaturized laser sources that allow system integration for industrial applications.

The work on 660 nm lasers was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) via grant 13N15403 for the QUIN project.

### Publications

- [1] G. Blume, O. Matalla, H. Wenzel, A. Maafidorf, D. Feise, J. Fricke, P. Ressel, S. Kreutzmann, A. Ginolas, A. Sahm, A. Knigge, K. Paschke, "Single mode 660 nm DBR tapered laser with 1 W optical output power", Proc. SPIE 12402, Components and Packaging for Laser Systems IX, Photonics West, San Francisco, USA, 1240205 (2023).

- [2] D. Feise, O. Senel, H. Wenzel, P. Della Casa, R.-St. Unger, J. Glaab, K. Paschke, "Distributed Bragg reflector tapered diode lasers emitting reliably more than 7 W at 1180 nm", Proc. SPIE 12867, 12867-21 (2024).

Nicht alle Wellenlängen sind mit Halbleiterlasern direkt zugänglich, lassen sich jedoch mithilfe der nichtlinearen Optik erreichen. Um nichtlineare optische Prozesse effizient zu betreiben, haben wir Trapezlaser mit integrierten Gittern bei 660 nm und 1180 nm entwickelt, die die erforderliche hohe spektrale Stahldichte für die Frequenzverdopplung bieten. Sie liefern 1 W Ausgangsleistung bei 660 nm und erreichen bei 1180 nm sogar bis zu 9 W. Ihre Emission ist spektral monomodig und enthält einen hohen Anteil (> 75 %) an räumlicher Grundmode. Damit bieten diese Laser nicht nur große Ausgangsleistungen, sondern auch eine hohe spektrale Strahldichte.

Die 660 nm Laser regen den Prozess der parametrischen Fluoreszenz an, um verschrankte Photonen im nahen und mittleren Infrarot zu erzeugen. Dadurch können Messungen schneller und einfacher als bislang im mittleren Infrarot durchgeführt werden, wobei gleichzeitig nur die nahinfraroten Photonen mit klassischer Siliziumtechnologie detektiert werden.

Die 1180 nm Laser nutzen wir für die Frequenzverdopplung, um orangegelbes Licht bei 590 nm zu generieren. Dieses Licht wird konventionell mit Natriumdampflampen erzeugt, um optische Messgeräte zu kalibrieren. Die neuen halbleiterbasierten Laserquellen werden um viele Größenordnungen heller sein.

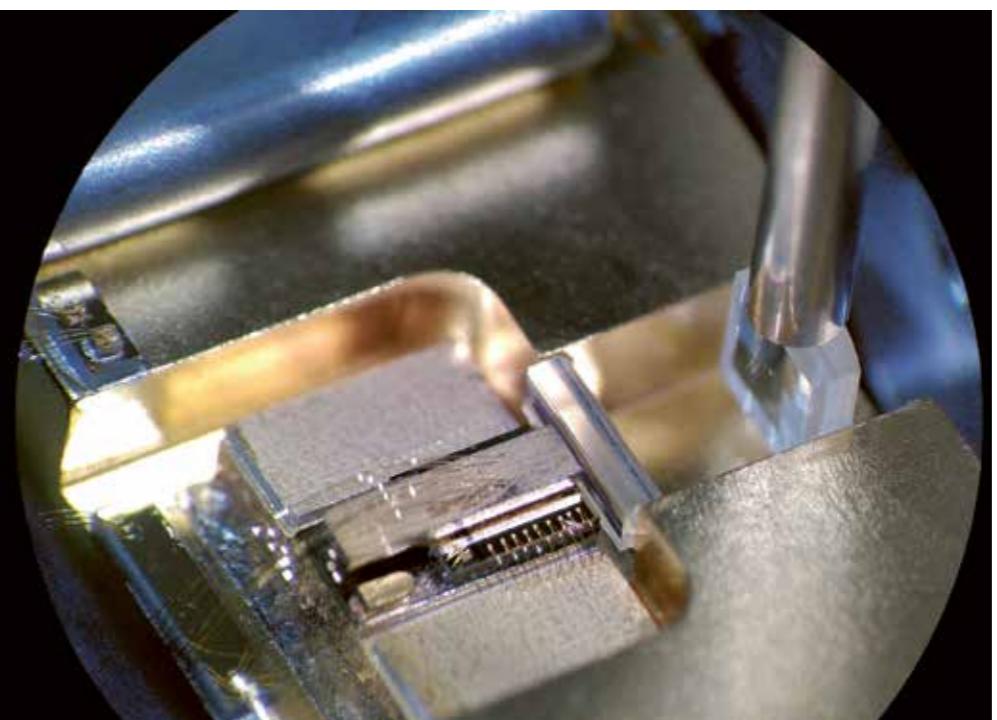


Fig. 2. DBR tapered laser on screening submount laser integrated into a module.

# Laser diodes emitting below 633 nm – targeting quantum photonics

The emerging field of quantum information processing has attracted the attention of both research and industry. Central to advances in this rapidly expanding area are laser sources. The wavelengths required for such quantum applications range from the infrared spectral region into the ultraviolet spectrum – many of which are provided by solid-state or fiber lasers and their higher harmonics. However, these laser sources do not cover the whole wavelength range needed, are rather complex, and cannot be significantly miniaturized. Semiconductor diode laser sources are thus particularly interesting due to their small form factor. Moreover, they can be mass-produced and their wavelength can be engineered. This makes diode lasers the most promising route for shrinking quantum information processing devices and making equipment like quantum computers accessible to the public.

A special focus is on red-emitting laser sources with wavelengths below 633 nm that are currently not commercially available. Examples of applications are qubits either based on trapped ions, molecules, or color centers in diamonds. Some

wavelength examples used in qubits are 628 nm and 626 nm, targeting calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ) and beryllium ( ${}^9\text{Be}^+$ ) respectively. Tin ions in diamond for example require laser radiation at 619 nm. The target power levels of these application cases are either in the tens of milliwatts range or in the case of 626 nm radiation in the one-watt range.

Our approach at FBH is to extend the emission range of GaAs-based lasers from 633 nm down to the above-mentioned wavelengths of interest. First, we focused on developing epitaxial laser structures with a gain maximum at 626 nm. This allows us to fabricate seed lasers and amplifiers for master-oscillator power-amplifier setups and spectrally stabilized lasers. For this, we performed detailed theoretical investigations to find the best-fitting layer structure [1]. This structure was then grown by metal-organic chemical vapor phase epitaxy on three-inch-wide wafers. The final broad area lasers emitted under pulsed excitation having a total maximum power of close to 1.4 W at 625 nm, reaching peak efficiencies of approximately 30 %.

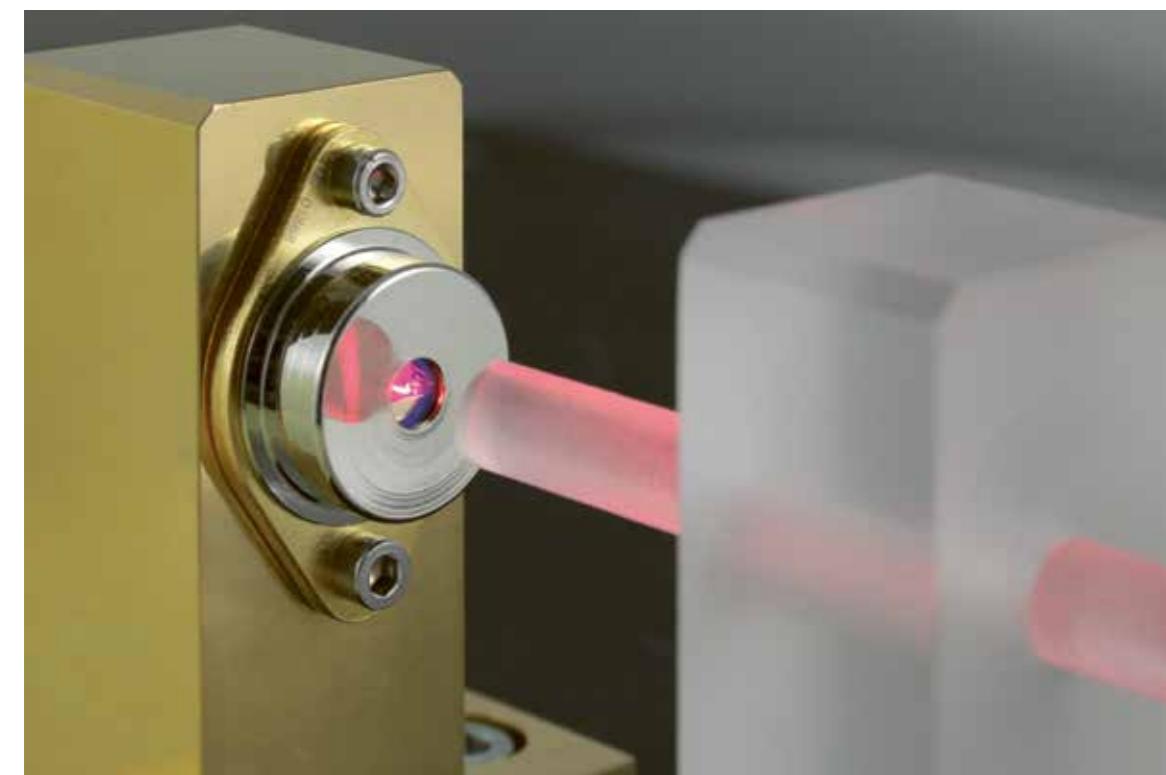


Fig. 1. Ridge waveguide laser in TO-3 housing with integrated Peltier element coolable to -30 °C.

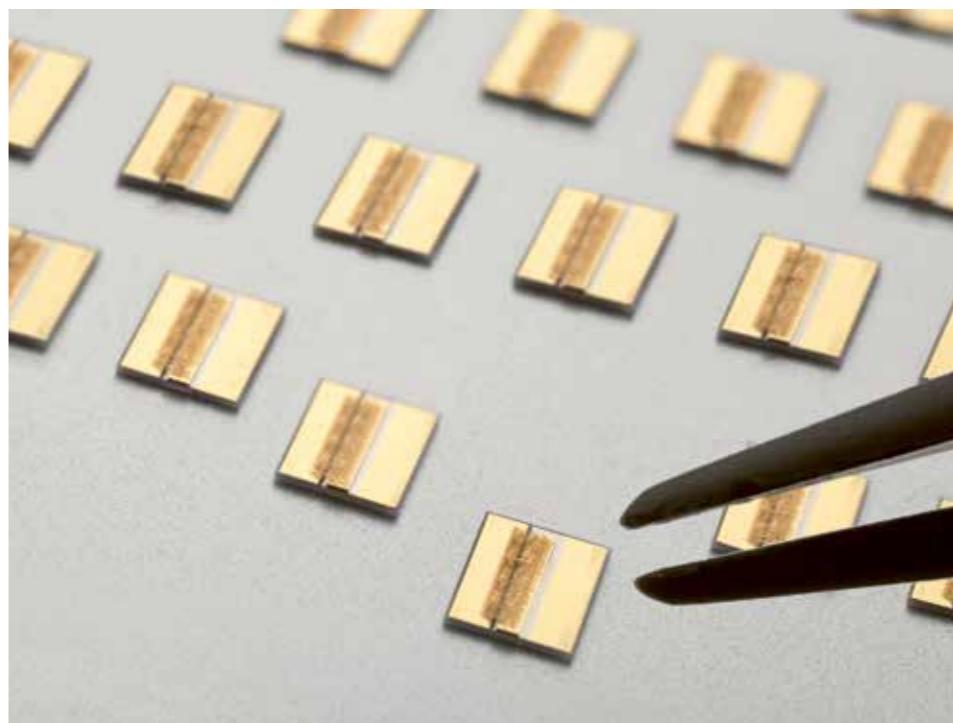


Fig. 2. Diode lasers manufactured for quantum information processing.

Based on these results, we fabricated ridge waveguide lasers. The spatial emission properties of these devices are excellent as they emit nearly diffraction-limited laser radiation up to an output power of 100 mW. Aging tests show a high reliability. The resulting lasers can be further tuned to even shorter wavelengths by cooling. For temperatures below the dew point, we utilize the industry-standard TO-3 housings with a waterless atmosphere and an internal Peltier element to achieve chip temperatures as low as -30 °C. With this capability, laser radiation as short as 619 nm can be generated at ambient room temperature. This breakthrough lays the foundation for miniaturized lasers and portable quantum information processing systems.

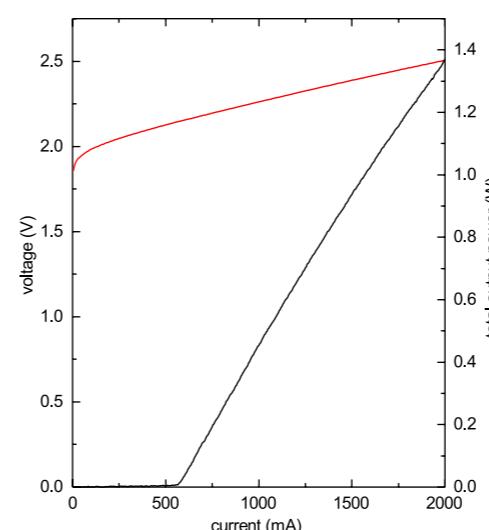


Fig. 3. Pulsed power current characteristic of a 60x1000  $\mu\text{m}^2$  broad area laser emitting at 625 nm.

Die Quanteninformationsverarbeitung gerät zunehmend in den Fokus von Wissenschaft und Industrie. Anwendungen sind unter anderem Qubits, die auf gefangenen Ionen, Molekülen oder Farbzentren in Diamant basieren. Laserquellen spielen dabei eine zentrale Rolle, da Qubits mittels Laserstrahlung gekühlt und manipuliert werden. Dafür eignen sich Halbleiterlaser, da sich ihre Wellenlänge flexibel einstellen lässt. Sie können zudem in großen Stückzahlen hergestellt werden und bieten einen kleinen Formfaktor. Für die Quanteninformationsverarbeitung werden unter anderem rote Wellenlängen unterhalb von 633 nm benötigt. Beispiele hierfür sind Quantensysteme mit Kalziumfluorid bei 628 nm oder Beryllium bei 626 nm, aber auch Zinn-Diamant-Farbzentren bei 619 nm.

Am FBH haben wir Laser entwickelt, die bei 625 nm emittieren. Diese Breitstreifenlaser erreichten gepulst bis zu 1.4 W Ausgangsleistung und bis zu 400 mW im Dauerstrichbetrieb. Montiert in geschlossene TO-3-Gehäuse können Anwender die Laser unter normalen Umgebungsbedingungen bis zu einer Temperatur von -30 °C betreiben. Die Emissionswellenlänge verschiebt sich dann zu 619 nm – und ermöglicht so zukünftig portable Systeme für die Quanteninformationsverarbeitung.

## Publications

- [1] F. Mauerhoff, H. Wenzel, A. Maßdorf, D. Martin, K. Paschke, G. Tränkle, "Optimization of high power AlGaN/P laser diodes at 626 nm", Opt Quant Electron 56, 419 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11082-023-06028-5>

- [2] F. Mauerhoff, O. Senel, H. Wenzel, A. Maßdorf, J. Boschker, J. Glaab, K. Paschke, G. Tränkle, "High power AlGaN laser diodes at 626 nm", Proc. SPIE PC12905, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XXIII, PC1290503, <https://doi.org/10.1117/12.3002216>

# Textile material identification using Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS)



To be able to recycle textiles sustainably, it is necessary to know their composition.

Textiles, such as clothing and furniture, are an integral part of our everyday lives. Understanding about how they are composed is relevant during production, for recycling, and forensics. Today, more than ever before, the demand on the textile industry is focused on sustainable recycling aiming towards a circular economy. Identifying textile materials, especially the colored ones, is an important requirement to choose material-specific recycling pathways, yet remains unsolved.

A potential solution offers Raman spectroscopy, applied for rapid and non-destructive analysis of dyed textiles in various colors. By providing a molecular fingerprint of the textile sample, it gives insights into its chemical composition. To address fluorescence interference caused by the fiber material or added dyes, we use Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS). This technique applies two slightly shifted narrow-band laser excita-

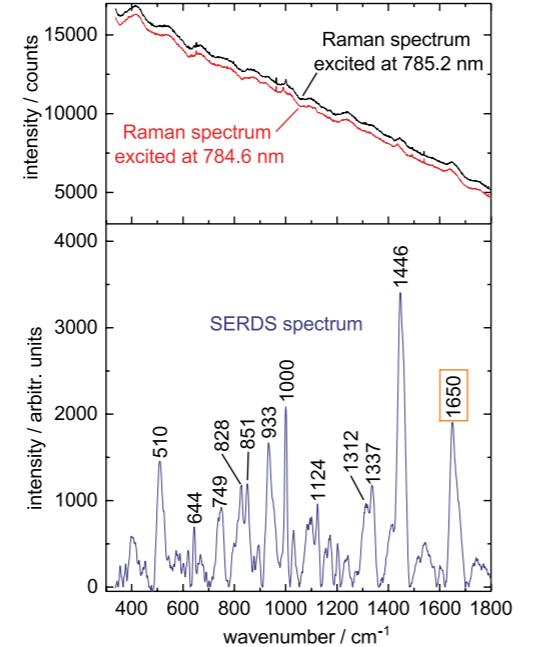


Fig. 1. Raman spectra of an undyed wool sample excited at two slightly shifted laser wavelengths (top) and reconstructed SERDS spectrum; numbers identify Raman signals of proteins, the material-specific Raman signal for wool is highlighted by a rectangle (bottom).

tion wavelengths. Raman signals follow the shift in wavelength while fluorescence remains unaffected. We conducted SERDS pilot investigations to identify 22 dyed and undyed textiles produced from cotton, viscose, wool, and polyester as commercially relevant materials. Experiments are performed using a compact laboratory setup, applying an in-house developed dual-wavelength diode laser emitting at 784.6 nm and 785.2 nm as excitation light source.

Fluorescence interference which masks characteristic Raman signals is observed even for undyed textiles, as exemplarily shown for wool in Fig. 1. However, SERDS enables to efficiently separate the Raman spectroscopic fingerprint of the sample from interfering contributions like fluorescence. With this technique, Raman signals of proteins can be detected, which allows to identify the textile material unambiguously as wool.

For dyed samples, we have to deal with Raman signals originating from the material but also signals attributable to the dye. This is exemplarily illustrated in Fig. 2 for SERDS spectra recorded from red textiles made of cotton, viscose, wool, and polyester. Despite strong contributions from Raman signals originating from the dyes, material-specific Raman signals are characteristic to identify the textiles as cotton ( $382\text{ cm}^{-1}$ ), viscose ( $358\text{ cm}^{-1}$ ), wool ( $1650\text{ cm}^{-1}$ ), and polyester ( $1611\text{ cm}^{-1}$  and  $1722\text{ cm}^{-1}$ ). For the two red wool samples, the SERDS spectra additionally confirm that different dyes have been used as evidenced by distinct Raman spectral patterns obtained.

Regarding automated textile sorting, we used partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) on the SERDS spectra. PLS-DA results show an excellent material-specific classification performance, achieving 100 % accuracy. Illustrated in Fig. 3, distinct clusters representing various material groups highlight the capability to reliably identify textiles made of single materials as well as binary material blends, regardless of color.

Our study, performed in cooperation with Technische Universität Berlin, demonstrates that SERDS is capable of identifying and discriminating selected textiles produced from commercially relevant materials. The investigations form a solid basis for textile analysis using SERDS in application areas like the textile industry and forensics.

The study was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the iCampus project, grant numbers 16ES1132 and 16ME0425, and by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUV), grant number 67KI2016.

Um Textilien nachhaltig im Sinne einer Kreislaufwirtschaft recyceln zu können, muss zunächst festgestellt werden, aus welchen Materialien sie bestehen. Wir nutzen dazu die Raman-Differenz-Spektroskopie mit leicht verschobenen Laser-Anregungswellenlängen (SERDS). Damit lässt sich die Zusammensetzung der Materialien zerstörungsfrei identifizieren – unabhängig von störenden Einflüssen durch Farbstoffe, die bei der Verarbeitung verwendet wurden, oder Fluoreszenz.

Als Kernkomponente kommt ein am FBH entwickelter Zwei-Wellenlängen-Diodenlaser mit Emissionen bei  $784.6\text{ nm}$  und  $785.2\text{ nm}$  zum Einsatz. Anhand eines Probensatzes von 22 gefärbten und ungefärbten Textilien sowie Textil-Gemischen konnten wir zeigen, dass sich SERDS gut eignet, um ausgewählte Textilien zu untersuchen. Neben den spezifischen spektralen Mustern des Materials lassen sich damit auch Signale der verwendeten Farbstoffe detektieren. Eine multivariate Analyse der Messdaten zeigte, dass verschiedene Textil-Materialien unabhängig von deren Färbung unterschieden werden können. Damit eröffnet SERDS neue Wege im Textil-Recycling.

## Publications

- K. Sowoidnich, K. Rudisch, M. Maiwald, B. Sumpf, K. Pufahl, "Effective Separation of Raman Signals from Fluorescence Interference in Undyed and Dyed Textiles Using Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS) as a Promising Tool for Textile Material Identification," in *Optica Sensing Congress 2023 (AIS, FTS, HISE, Sensors, ES), Technical Digest Series (Optica Publishing Group)*, paper AM2A.4 (2023).

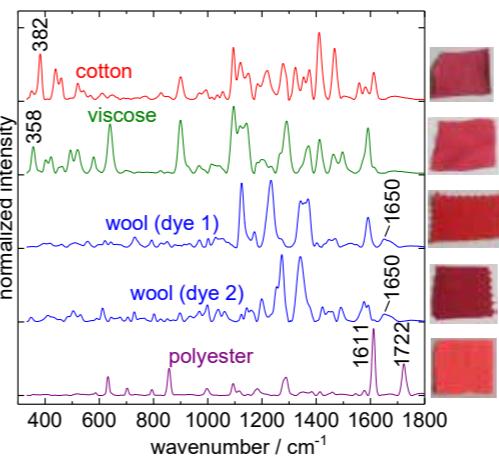


Fig. 2. SERDS spectra of red textiles composed of different materials; spectra are normalized and vertically offset for clarity, numbers indicate material-specific Raman signals. Images on the right show photographs of corresponding textile samples.

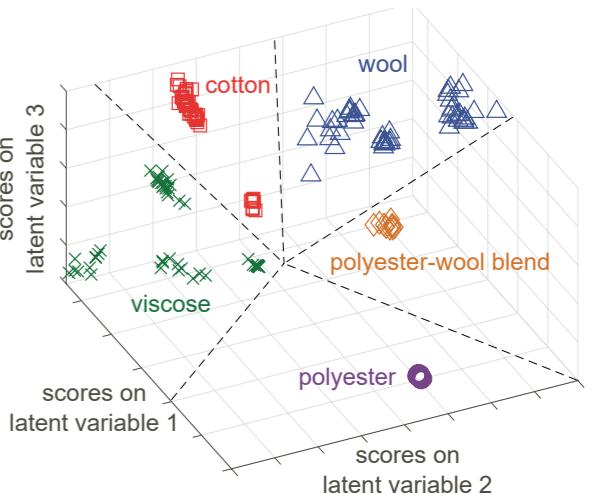


Fig. 3. Three-dimensional plot of scores from partial least squares discriminant analysis. Dashed lines indicate material-specific separation of distinct textiles.

# Improved 226 nm LEDs for gas sensing – development from epitaxy to chip packaging



Fig. 1. Exemplary application of 226 nm LEDs – nitrogen oxide monitoring in power plants.

In recent years, far-UVC LEDs with emission wavelengths shorter than 240 nm have attracted more and more attention. They are beneficial light sources for skin-safe disinfection, especially to eradicate multi-drug-resistant germs, as well as for gas sensing applications. One particularly interesting toxic gas that needs to be monitored in exhaust systems of combustion engines and power plants is nitrogen oxide (NO), which has a sharp absorption line at 226 nm. Currently, bulky and expensive light sources based on gas discharge lamps and optical filters are used to detect NO by optical absorption. Therefore, the demand for small, compact, and reliable light sources with this emission wavelength – as provided by light emitting diodes (LEDs) – is high. However, the wall-plug efficiencies of LEDs emitting at wavelengths below 240 nm so far are in the range of 1 % or less. Furthermore, the efficiency decreases drastically when the wavelength is reduced, with a factor of two every 2 nm.

During the last year, we have started developing 226 nm LEDs that are based on findings from our previously optimized 233 nm LEDs. To make the n-AlGaN contact layer optically transparent, we have increased the Al mole fractions from 83 % to 87 %.

Similarly, the material composition of the 6-fold quantum wells and the quantum well barriers was modified. One challenge for the n-AlGaN contact layer was to find a good compromise between electrical conductivity and optical transparency at 226 nm. Since the high aluminum content in the n-AlGaN layer reduces the lateral current spreading length, LED chips with an optimized contact layout had to be developed.

In a first study, we investigated the influence of the quantum well barrier height on emission power and lifetime. For this, the Al mole fraction of the quantum well barriers was varied (82 %, 86 %, and 89 %). We found that the emission power as well as the L70 lifetime drops with an increasing Al mole fraction of the quantum well barriers and therefore with an increasing barrier height by 60 % and 69 %, respectively. In a second experiment, we compared LEDs with the same quantum well barrier height (Al mole fraction 86 %) but with different quantum well numbers. LEDs with nine quantum wells were found to show a 30 % lower mean emission power than those with six quantum wells. However, their L70 lifetime was higher by a factor of more than five.

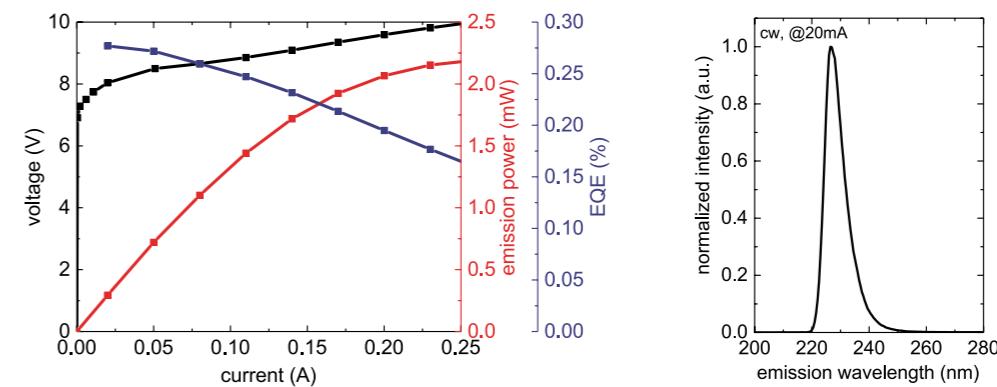


Fig. 3. Characteristics of a packaged 226 nm LED at 20 °C (cw).

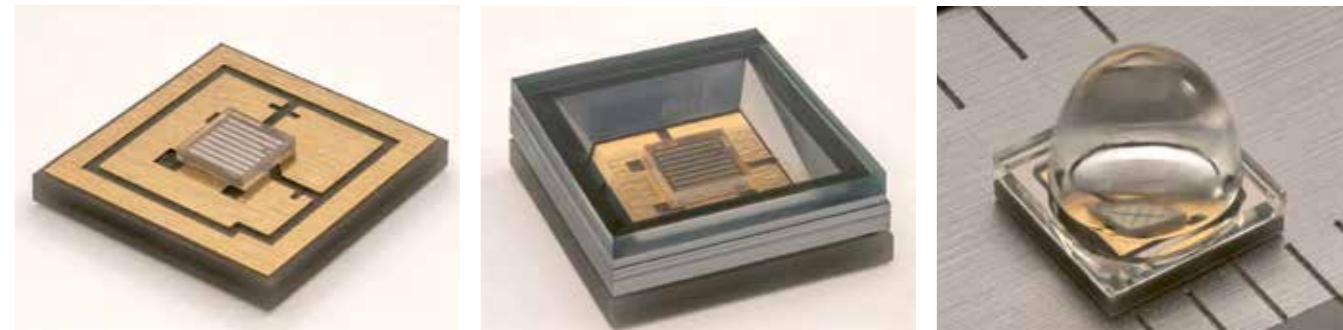


Fig. 2. Left to right: UV LED chip on planar ceramic submount, in a package with reflector and flat window, and with ellipsoidal lens.

The 226 nm LED chips are flip-chip soldered on planar AlN ceramic packages. Depending on the application, the LED package can be capped with hermetically sealed flat windows or ellipsoidal lenses to adjust the optical far field. A selection of realized designs is shown in Fig. 2.

Based on these optimizations, 226 nm LEDs are now available for use in gas sensing. Hero devices yield a peak external quantum efficiency (EQE) of 0.28 % (wall plug efficiency of 0.18 %), an emission power of 2.1 mW, and an operation voltage of 9.6 V at 200 mA (see Fig. 3). We expect further LED performance improvements, e.g., from combining an even larger number of quantum wells with a lower quantum well barrier as well as an adjusted n-AlGaN contact layers with enhanced transparency.

## Publication

T. Kolbe, H. Cho, S. Hagedorn, J. Rass, J. Ruschel, S. Einfeldt, M. Weyers, "226 nm far-ultraviolet-C light emitting diodes with an emission power over 2 mW", Phys. Stat. Sol. RRL, <https://doi.org/10.1002/pssr.202400092>

Fern-UVC LEDs eignen sich nicht nur für die Desinfektion, sondern auch für industrielle Anwendungen in der Gassensorik. Stickoxid mit seiner ausgeprägten Absorptionslinie bei 226 nm ist hierbei ein interessantes toxisches Gas, da es in Abgasystemen von Verbrennungsmotoren oder Kraftwerken überwacht werden muss. Mit der Entwicklung von LEDs dieser Wellenlänge haben wir im letzten Jahr am FBH begonnen. Um das Design der aktiven Zone der Halbleiterschichtstruktur zu optimieren, haben wir LEDs mit unterschiedlicher Quantenfilmanzahl und Barrierenhöhe untersucht. Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Lichtleistung als auch die L70-Lebensdauer mit zunehmender Barrierenhöhe abnimmt. Die Lichtleistung von LEDs mit neun Quantenfilmen war 30 % geringer als bei jenen mit sechs Quantenfilmen. Hingegen war ihre L70-Lebensdauer um mehr als einen Faktor fünf höher.

Erste, entsprechend optimierte 226 nm LEDs sind nun für den Einsatz in der Gassensorik verfügbar. Die leistungsstärksten LEDs erreichen im Betrieb bei 200 mA eine externe Quanteneffizienz von 0,28 %, eine Lichtleistung von 2,1 mW sowie eine Betriebsspannung von 9,6 V.

# Integrated Quantum Technology

## Integrierte Quantentechnologie

Within our research area Integrated Quantum Technology, we carry out R&D activities to bring quantum technology (QT) from proof-of-concept demonstrations in a quantum optics lab to industry. This paves the way for the second quantum revolution so that QT can unfold its potential for tomorrow's society. Applications include quantum sensing, quantum communication, and quantum computing, working outside the lab in the field as well as in space. FBH research currently focuses on the following topics:

### > **Quantum photonic components**

– development of electro-optical components and hybrid micro-integrated modules providing and processing coherent radiation required, e.g., for the implementation of quantum optical sensors or quantum computers based on cold ions or neutral atoms. Emphasis is on the development of narrow and ultra-narrow linewidth diode lasers.

### > **Integrated quantum sensors**

– using high-precision spectroscopy techniques with atomic ensembles either at room temperature or, by laser cooling, near absolute zero. Realization of compact instruments for highly accurate measurements of physical quantities, such as frequency, acceleration, electric or magnetic fields.

### > **Diamond nanophotonics**

– nanostructured diamond systems and materials targeting novel concepts for guiding, trapping, and manipulating light at the nano- and microscale. One aim is to develop quantum security devices based on entanglement for secure and versatile future quantum communication, authentication, and information platforms. Another target is to develop quantum magnetometers for highly sensitive and versatile sensing applications.

### > **Photonic quantum technologies**

– development of quantum devices based on optical chips that can be directly interfaced with optical fibers, e.g. for tap-proof communications. The quantum chips are based on waveguides, directional couplers, optical circulators, and resonators that will be co-integrated with ultra-strong optical nonlinearities.

In unserem Forschungsbereich Integrierte Quantentechnologie führen wir F&E-Aktivitäten durch, mit denen Proof-of-Concept Demonstratoren der Quantentechnologie (QT) aus dem Labor in industrietaugliche Lösungen überführt werden sollen. Dies wird der zweiten Quantenrevolution den Weg ebnen, sodass die QT ihr Potenzial für die Gesellschaft von morgen entfalten kann. Zu den adressierten Anwendungen zählen die Quantensensorik, die Quantenkommunikation und das Quanten-Computing – außerhalb des Labors im Feld ebenso wie im Weltraum. Aktuell setzen wir am FBH die folgenden Schwerpunkte:

### > **Quantenphotonische Komponenten**

– Entwicklung von elektro-optischen Komponenten und hybrid-mikrointegrierten Modulen, die kohärente Strahlung für die Implementierung von quantenoptischen Sensoren oder Quantencomputern auf Basis von kalten Ionen oder neutralen Atomen erzeugen und aufbereiten. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Lasern mit schmalbandiger und ultraschmalbandiger Emission.

### > **Integrierte Quantensensoren**

– Realisierung kompakter und robuster Sensoren basierend auf hochpräzisen Spektroskopiemethoden. Hierfür werden atomare Ensembles verwendet, die bei Raumtemperatur oder – lasergekühlt – nahe dem absoluten Nullpunkt manipuliert werden. Wir untersuchen die Realisierung von Messgeräten, die physikalische Größen wie Frequenz, Beschleunigung, elektrische oder magnetische Felder mit höchster Präzision bestimmen können.

### > **Diamant-Nanophotonik**

– nanostrukturierte Diamantsysteme und -materialien für neuartige Konzepte zum Führen, Fangen und Manipulieren von Licht auf der Nano- und Mikroskala. Ein Ziel ist es, auf Verschränkung basierende Quantensicherheits-Komponenten zu entwickeln, die sichere und vielseitige zukünftige Quantenkommunikations-, Authentifizierungs- und Informations-Plattformen ermöglichen. Auch Quantenmagnetometer für hochempfindliche und vielseitige Sensoranwendungen sollen entwickelt werden.

### > **Photonische Quantentechnologien**

– Entwicklung von Quantenbauelementen auf der Grundlage optischer Chips, die direkt mit Glasfasern gekoppelt werden können, um u. a. abhörsichere Kommunikation zu realisieren. Die Quantenchips werden auf Wellenleitern, Richtungskopplern, optischen Zirkulatoren und Resonatoren basieren, co-integriert mit ultrastarken optischen Nichtlinearitäten.

# Meeting the tough requirements of quantum sensor applications – comprehensive characterization of optical feedback and reverse gain of amplifiers

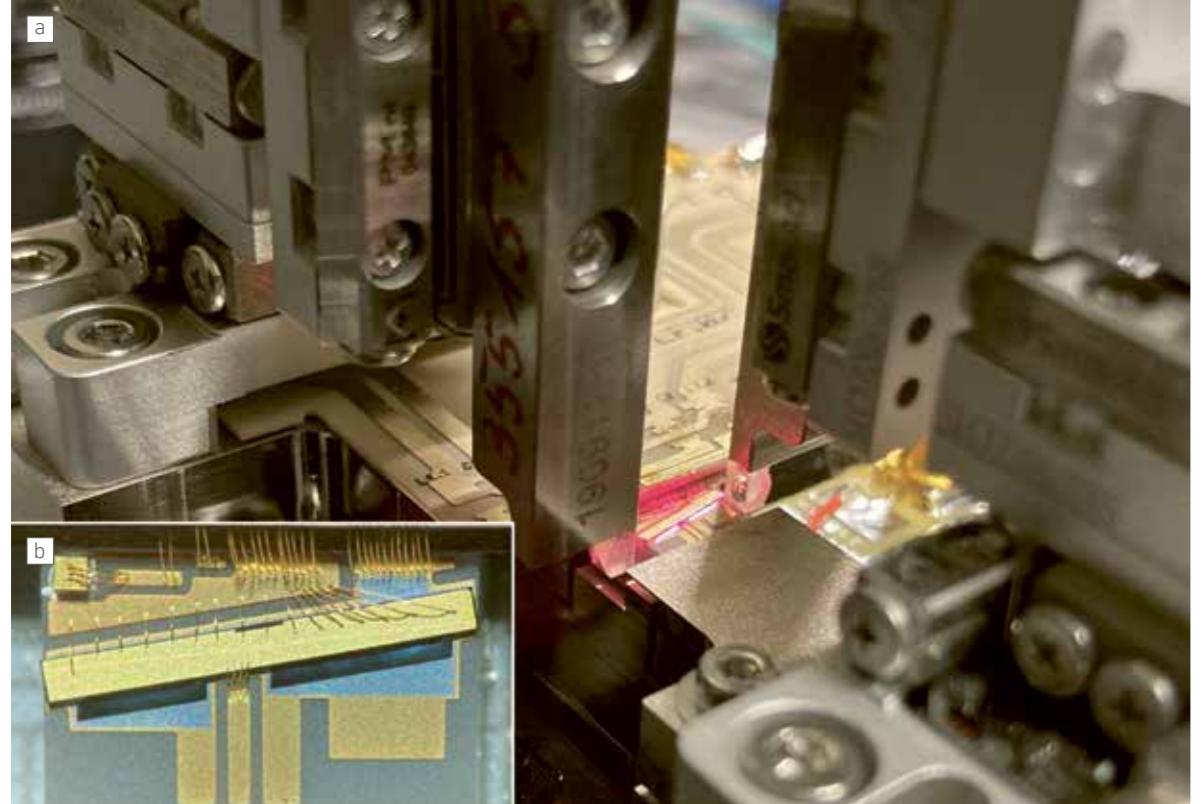


Fig. 1. (a) An amplifier chip for 767 nm in the test setup. (b) Microscope image of the semiconductor optical amplifier chip (the long rectangle in the middle, 6 mm long) soldered onto a submount.

Within the project "Bose Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory" (BECCAL), an experiment platform for ultracold atoms and atom interferometry is being developed for installation on the International Space Station (ISS). The ISS in its orbit around Earth is in a constant free fall. This microgravity environment enables experiments that would otherwise only be feasible in drop towers on Earth for very short durations. On the BECCAL platform, various experiments are planned, e.g., testing the universality of free fall (a fundamental postulate of general relativity) and quantum sensing applications such as mapping the Earth's gravitational field [1].

In the Joint Lab Quantum Photonic Devices, we develop and build different laser modules for this experiment platform. These laser systems are needed to cool rubidium and potassium atoms to very low temperatures, trap, and manipulate them, or read out their status.

However, these highly sensitive quantum experiments impose tough requirements on our laser systems. For example, they need to be highly stable, meaning oscillation frequency and wavelength must not vary over time, which is usually measured by the laser's linewidth or its frequency noise spectrum. To meet the demands for the planned applications, they must also provide a high output power, ranging from approximately 375 mW

to 750 mW (depending on the wavelength) at the exit facet of the amplifier chip. Addressing these requirements, our laser modules use a combination of an external-cavity diode laser (ECDL) with a linewidth of <100 kHz and a semiconductor optical amplifier chip, which amplifies the light of the ECDL to the required power (see Figs. 1 & 2).

Optical feedback (reflections of light back to the laser) can affect the performance of a laser, especially in terms of frequency stability. In our laser module configuration, the problem of feedback is even increased, as the optical amplifier used to amplify the laser light is symmetrical. By simultaneously working in backward direction, it will also amplify feedback towards the laser. To address this challenge, we have developed a new tabletop setup to characterize the amplification of the chips in backward direction while maintaining normal forward operation [2] and in which we can create well defined reflections of varying reflection coefficients.

Our focus is particularly on low feedback powers around 0.01% (-40 dB) of the laser output power, as expected in real experimental setups. In the case of our 767 nm laser module, we anticipate a feedback of approximately 30 µW out of the 375 mW output power from the amplifier.

The gain in reverse direction of the amplifier depends on a number of operating parameters as well as the amount of light power in forward direction. By testing them with our tabletop setup, we determined that under the expected parameters, e.g., 30 µW feedback will be amplified to around 1 mW. As the laser cannot be stable under such high feedback conditions, optical isolators need to be used. Faraday isolators are magneto-optic devices that let light pass through in one direction, but strongly attenuate it in the backward direction. Thus, they are suited to reduce the feedback power that couples into the laser. We prop-

erly characterize the feedback levels to specify the required performance of these isolators, thus keeping the ECDL stable for the planned experiments.

This project was supported by the German Aerospace Center (DLR) under grants 50WP1704 and 50WP2104.

Ziel des Projekts „Bose Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory“ (BECCAL) ist eine Experiment-Plattform für Atom-Interferometrie auf der Internationalen Raumstation (ISS). Für die damit geplanten Quantenexperimente entwickeln und bauen wir Lasermodule, mit denen die Atome im Experiment gekühlt, eingefangen, manipuliert oder ausgelesen werden sollen.

Um die erforderliche Frequenzstabilität zu erreichen, nutzen wir External-Cavity-Diodenlaser. Das Laserlicht wird danach im Modul durch optische Halbleiterverstärker auf die erforderliche Ausgangsleistung verstärkt. Da diese symmetrisch sind, verstärken sie auch rückwärts propagierendes Licht, das durch Reflexionen verursacht wird und die Stabilität des Lasers beeinflussen kann. Um diese Rückwärtsverstärkung der Chips abhängig von diversen Parametern zu charakterisieren, während die Chips im normalen Vorwärtsbetrieb laufen, haben wir ein experimentelles Setup aufgebaut.

## Publications

- [1] K. Frye, S. Abend, W. Bartosch, A. Bawamia, et al., "The Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory", EPJ Quantum Technol., vol. 8, no. 1, <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-020-00090-8>
- [2] J. Baumann, T. Kamal, B. Arar, C. Kürbis, A. Bawamia, A. Wicht, "Investigations on Amplification of Feedback in Single-Mode Ridge Waveguide Optical Amplifiers at 767nm", in CLEO 2023, Technical Digest Series (Optica Publishing Group), paper JW2A.14, [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2023.JW2A.14](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2023.JW2A.14)

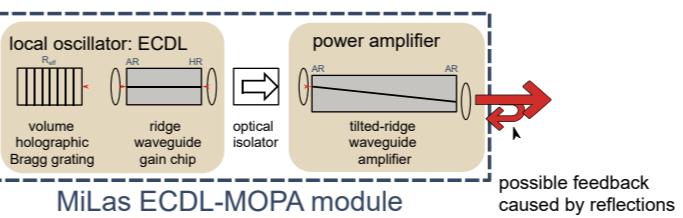


Fig. 2. Diagram of our modules with an external-cavity diode laser (ECDL) in a "master oscillator – power amplifier" configuration.

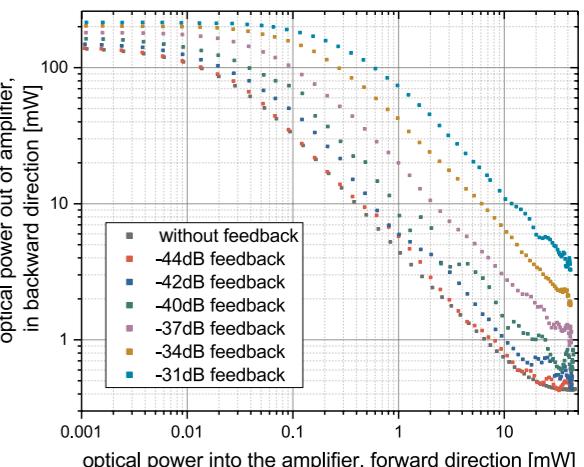


Fig. 3. Example measurement of the light power that exits a 767 nm amplifier in backward direction with varying input power in forward direction and for different feedback levels.

# A novel miniaturized repumping module for compact strontium-based optical atomic clocks

Optical atomic clocks have long surpassed their microwave-based counterparts in terms of precision and accuracy. This advancement does not only spark excitement in fundamental research circles and points towards a future redefinition of the standard international unit of time, but also promises significant potential for improving global satellite navigation systems (GNSS). However, the path towards utilizing optical atomic clocks in space is challenging, demanding high degrees of integration, miniaturization, and robustness across all components. Jointly with our project partners Humboldt-Universität zu Berlin, Menlo Systems GmbH, and QUBIG GmbH, we are developing a highly integrated optical clock based on a lattice of strontium (Sr) atoms. Our Joint Lab Quantum Photonics Components is realizing the required laser sources and photonic modules to provide and manipulate optical radiation at different wavelengths to operate the optical clock.

The design of such a photonic module is shown in Fig. 1. With a compact size of only  $200 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$ , it provides a polarization-maintaining fiber-coupled optical output for two laser wavelengths at 679 and 707 nm. The output fiber will be connected to the Sr-containing vacuum chamber of the optical clock, where the delivered wavelengths drive a so-called repumping scheme to enhance the clock's efficiency. The laser light at 679 and 707 nm is emitted by custom-designed distributed Bragg reflector (DBR) laser chips. They deliver optical output powers of up to 70 mW in stable single-longitudinal-mode operation with an emission linewidth on the order of 1 MHz. Frequency specificity and stability (Fig. 2) are ensured by a surface grating incorporated directly into the chip. This renders DBR devices more compact and robust than comparable lasers with external gratings – a favorable characteristic with regard to future deployment in space.

Miniaturization is also key for other optical components of the repumping module. Compact acousto-optic modulators (AOM) developed by QUBIG GmbH allow for efficient amplitude modulation with RF-power consumption of only a few tens of mW. Furthermore, we have developed miniature optical isolators ( $< 10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ) based on the magneto-optic alloy  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  (Fig. 3), which can be tailored to the required operating wavelength by adjusting the inclusion of manganese in CdTe. Optimized for 689 nm, another recently assembled isolator shows an optical isolation of at least 30 dB with a transmission close to 80%. The performance achieved is similar to that of commercially available isolators, but with a significantly reduced footprint.

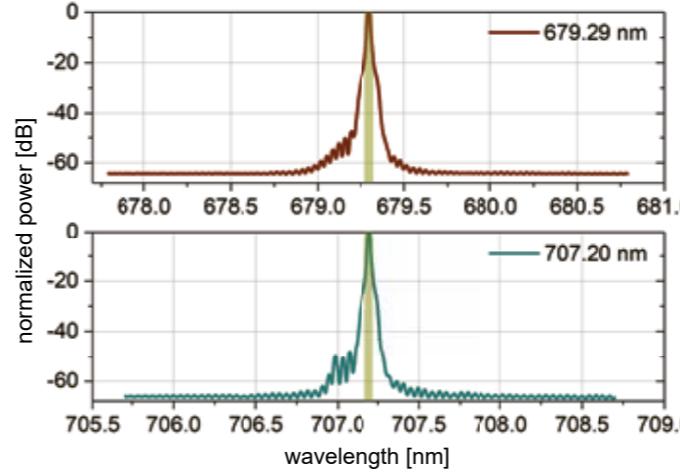


Fig. 2. Optical spectra of the DBR lasers at 70 mW optical output power; resolution limited by resolution of the optical spectrum analyzer.

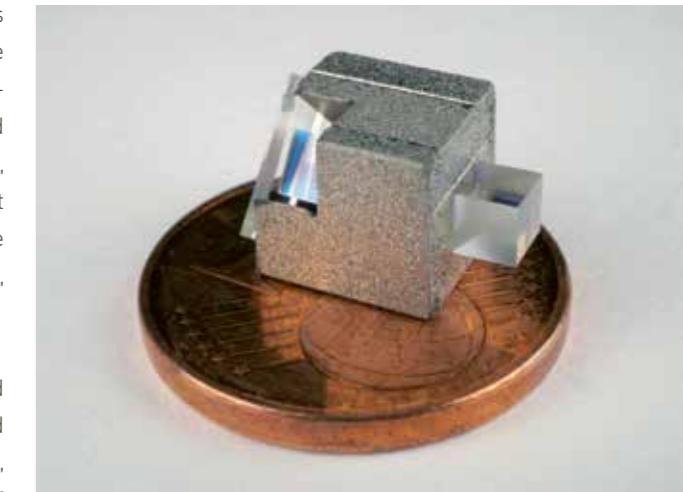


Fig. 3. Assembled optical isolator on coin.

In the near future, the repumping module design will be turned into real hardware, facilitated by our unique and versatile hybrid micro-integration technology. As part of an integrated solution, our photonic modules contribute to reducing the complexity of optical atomic clocks. This is a crucial step towards compact and robust timekeeping systems in space.

The SOLIS-1G project is supported by the German Aerospace Center (DLR), DLR Space Administration with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under grant numbers 50WM2152, 50WM2053, 50WM2351C, and 50WM2261B, and by VDI Technologiezentrum GmbH with funds provided by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under grant number 13N15724.

## Publications

C. Pyrlík, N. Goossen-Schmidt, M. T. Hassan, A. Bawamia, J. Fricke, A. Knigge, A. Maasdorf, M. Schiemangk, H. Wenzel, A. Wicht, "High Power Distributed Bragg Reflector Lasers at 689.45 nm for Quantum Technology Applications", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 34, 679–682 (2022).

N. Goossen-Schmidt, C. Pyrlík, B. Arar, M. T. Hassan, A. Bawamia, J. Fricke, A. Knigge, A. Maasdorf, M. Schiemangk, H. Wenzel, A. Wicht, "Red-Emitting Distributed Bragg Reflector Lasers for Strontium-Based Optical Atomic Clocks", *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, Germany (2023).

C. Tyborski, M. T. Hassan, T. Flisgen, M. Schiemangk, A. Wicht, "Extensive study of magneto-optical and optical properties of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  between 675 and 1025 nm", *AIP Advances* 13, 015213 (2023).

J. Hamperl, N. Goossen-Schmidt, B. Arar, M. Bursy, S. Hariharan, N. Müller, M. Schiemangk, S. Szermer, C. Tyborski, D. Zou, A. Wicht, "Miniaturized Laser Distribution Module for Compact Sr-Based Optical Atomic Clocks", *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Charlotte, USA (2024).

Optische Atomuhren ermöglichen die präzisesten Zeitmessungen, die je erreicht wurden. Daher werden sie nicht nur in der Grundlagenforschung eingesetzt, sie bergen zudem das Potenzial, die Genauigkeit von Satelliten-Navigationssystemen maßgeblich zu steigern. Am FBH entwickeln wir zusammen mit Projektpartnern aus Forschung und Industrie eine kompakte, weltraumtaugliche optische Atomuhr, die auf einem Gitter aus Strontium-Atomen basiert. Ein solches System erfordert ein hohes Maß an Integration, Miniaturisierung und Robustheit aller Komponenten. Zu diesem Zweck liefern wir verschiedene photonische Module, mit deren Hilfe die benötigte Laserstrahlung erzeugt und manipuliert werden kann. Ein Beispiel dafür ist ein kompaktes Modul, das Laserlicht mit den Wellenlängen 679 und 707 nm generiert. Es enthält zwei Distributed-Bragg-Reflector-Laserchips, die speziell für diese beiden Wellenlängen entwickelt wurden und eine hohe Frequenzstabilität aufweisen. Hinzu kommen weitere ultrakompakte elektrooptische Komponenten, die eine hochintegrierte Systemlösung ermöglichen.



Fig. 1. CAD model of the SOLIS-1G repumping module. Dimensions are ca.  $200 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$ .

# Enabling technologies for compact atomic physics packages

Atomic quantum technologies offer unprecedented precision and accuracy, unlocking novel applications in timekeeping and sensing. However, transitioning from laboratory setups to field applications requires high levels of integration, miniaturization, and robustness under varying environmental conditions. In the Joint Lab Integrated Quantum Sensors (IQS), we advance compact atom-based measurement devices, particularly addressing the miniaturization of the physics package. This requires a toolbox of qualified high-precision integration techniques and cost-effective production of components and systems, ensuring high reproducibility and robustness.

We develop and refine adhesive integration technologies for micro-integrated electro-optical systems and compact physics packages and qualify them in application-relevant geometries and materials. To evaluate the bond strength with die shear strength tests, we set up samples using fused silica blocks ( $2 \times 4 \text{ mm}^2$ ) that are bonded with UV and hybrid curing epoxy adhesives onto substrates. Assembly is realized with a micro-integration facility, allowing for precise alignment of a  $30 \mu\text{m}$  adhesive layer. Environmental aging effects in field applications are studied through thermal cycling (-55 °C to 85 °C and 150 °C, 100 cycles) and  $\gamma$ -radiation exposure from a Co60 source (10 krad (Si)).

Results from an exemplary adhesive indicate that the bond strength increases with environmental loads, see Fig. 1 alongside relevant industry standards. This is potentially caused by additional cross-linking or relaxation effects within the formed polymer network. Moreover, we investigated the failure mechanism and the influence of surface activation using plasma cleaning, showing nearly doubled bond strength. These insights are key for understanding adhesive joint properties in our application and are required parameters for finite-element simulations of integrated systems under external mechanical loads. Further investigations include pointing stability of micro-optics, outgassing measurements for vacuum applications, tensile strength tests, and cure reaction optimization using differential scanning calorimetry. Required instrumentation is available within IQS.

We regularly realize miniaturized electro-optical systems and physics packages using micro-integration of optical elements on a common substrate, a micro-optical bench. For stable setups under mechanical and thermal loads, materials with high specific modulus, suitable thermal conductivity, and thermal expansion are crucial. Moreover, a high mechanical precision of the substrate is required, often incorporating dedicated geometries to align and mount optical components. Ceramic materials are an

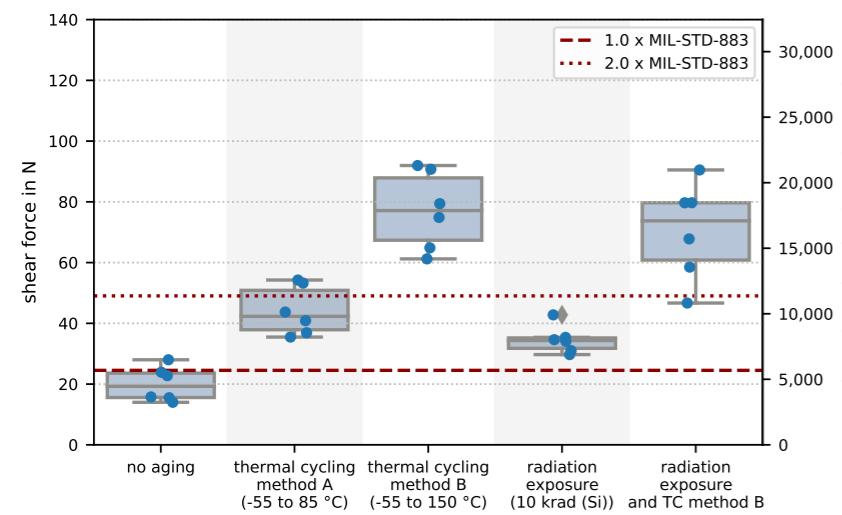


Fig. 1. Die shear strength of adhesive samples under environmental loads, shown as individual value and boxplot. The y-axis includes shear strength in g-load on a typical micro-optic. Samples were subject to thermal aging according to MIL-STD-883L and  $\gamma$ -radiation exposure.

established choice for micro-optical benches due to their excellent material properties. We efficiently fabricate such substrates with additive methods using lithography-based ceramic manufacturing (LCM), as exemplified in Fig. 2. This approach enables rapid prototyping, easy customization, and scalable production – critical in a R&D environment.

This work is supported by the German Space Agency (DLR) with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) due to an enactment of the German Bundestag under grant numbers DLR50WM1949, 50RK1978, and 50WM2070.

## Publications

- M. Christ, A. Stiekel, C. Stölmacker, C. Zimmermann, A. Kassner, M. Wurz, M. Krutzik, "Micro-integrated optical systems and qualification of adhesive integration technologies for cold atomic quantum sensors", Proc. of SPIE, vol. 12777, International Conference on Space Optics (ICSO 2022), Dubrovnik, Croatia, 1277718, <https://doi.org/10.1117/12.2689275>

Dank ihrer Präzision ermöglichen atomare Quantentechnologien neuartige Anwendungen in Zeitmessung und Sensorik. Um diese jedoch aus dem Labor ins Feld zu überführen, ist ein hohes Maß an Integration, Miniaturisierung und Robustheit erforderlich. Im Joint Lab Integrated Quantum Sensors (IQS) entwickeln wir die dafür benötigten kompakten, atom-basierten Systeme. Diese erfordern qualifizierte Technologien und Verfahren zur Fertigung und Integration mit hoher Präzision. Daher qualifizieren wir adhäsive Integrationstechnologien für mikrointegrierte elektro-optische Systeme unter verschiedenen Umweltbelastungen, beispielsweise durch thermische Zyklen und die Exposition mit Gammastrahlung.

Diese Tests sind notwendig, um die Zuverlässigkeit in realen Anwendungen zu gewährleisten und Integrationsprozesse zu optimieren. Miniaturisierte Systeme werden häufig durch Mikrointegration optischer Elemente auf keramischen Mikro-optikbänken hergestellt. Wir realisieren diese effizient und präzise mithilfe der Lithographie-basierten additiven Fertigung. Dadurch lassen sich die Systeme schnell anpassen und produzieren, was für die Entwicklung zukunftsfähiger Quantentechnologien in F&E-Umgebungen unerlässlich ist.



Fig. 2. Additively manufactured alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) example components, including micro-optical benches, mounts for electro-optical components, and test structures to optimize print and post-processing parameters.

# CRONOS Pathfinder: an optical rubidium two-photon clock from laboratory to space



Fig. 1. CAD rendering of the satellite bus TUBiX20 for the optical clock payload CRONOS (© Julius Leglise).

Optical atomic clocks stand out as the pinnacle of precision technology. The best of their kind measure time with an impressive precision of up to 19 digits – four orders of magnitude superior to microwave clocks, the current timekeeping backbone. The advantage of optical clocks lies in their higher oscillator frequency, enabling finer time measurements. Their exceptional precision paves the way for remarkably accurate measurements in fundamental physics and finds applications in navigation, timekeeping, and data network synchronization.

An optical clock consists of two fundamental components: the optical oscillator, typically a laser with its output frequency precisely disciplined to a narrow linewidth optical transition, and a frequency comb serving as the clockwork. The latter translates the laser's optical oscillations from hundreds of terahertz (THz) down to the radio frequency (RF) range, making them electronically countable time increments.

With CRONOS Pathfinder, we aim to develop the first spaceborne optical clocks with a size, weight, and power consumption suitable for micro-satellite missions in low Earth orbit. The frequency comb is developed by Menlo Systems GmbH, while the satellite bus is built by Technische Universität Berlin (Fig. 1). The FBH is developing the optical oscillator.

The CRONOS optical oscillator utilizes a micro-integrated extended cavity diode laser stabilized to a narrow linewidth two-photon transition in rubidium at 778 nm. The rubidium spectroscopy module comprises a fiber-coupled, micro-integrated optical setup for two-photon fluorescence spectroscopy. At its core lies a small, heated rubidium vapor cell shielded by Mu-metal. The cell is thermally isolated and heated to about 100 °C to provide sufficient rubidium vapor pressure. When the laser frequency is resonant with the two-photon transition, the rubidium atoms are excited and relax under emission of a fluorescence photon at 420 nm (see Fig. 2). These photons are collected by a lens system and detected by a silicon photomultiplier chip (SiPM). This signal is used in an electronic feedback loop to stabilize the optical frequency of the extended cavity diode laser to the center of the two-photon transition.

In cooperation with Humboldt-Universität zu Berlin, we have built two rubidium two-photon frequency references as laboratory setups. Optimizations and stability tests yielded a fractional frequency instability of  $1.5 \times 10^{-13}$  per square root of integration time – equivalent to approximately 100 femtoseconds of time deviation per second as can be seen in (Fig. 3). Long-term performance measurements indicate that an optical clock based on our two-photon reference would, on average, not lose a single second in 11 million years.

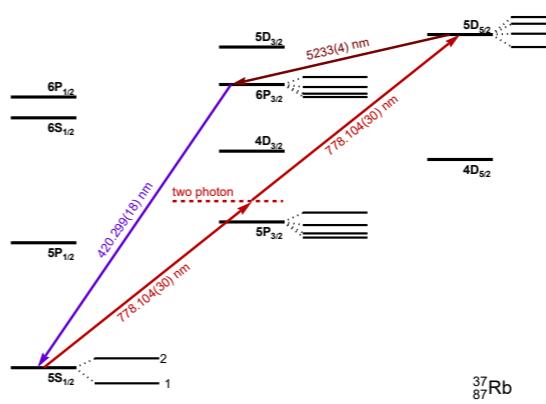


Fig. 2. Energy level scheme of the rubidium atom with the two-photon excitation transition and the fluorescence detection line.

Construction of the first components for a flight-like spectroscopy module has recently commenced (Fig. 4), alongside testing of sub-assemblies for space readiness. Proving the viability of this reference in space enables its future application, particularly targeting the next generation of precise GNSS applications. CRONOS is aimed for an in-orbit verification mission around the year 2027.

Developments are carried out in a collaboration with Technische Universität Berlin and Menlo Systems GmbH. This work is supported by the German Space Agency DLR with funds provided by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) under grant number DLR 50RK1971 and 50WM2164.

Optische Uhren sind deutlich präziser und stabiler als Mikrowellenuhren. Sie liefern wichtige Erkenntnisse in der Grundlagenphysik und erschließen neue Anwendungsbereiche in Navigation, Zeitmessung oder der Synchronisierung von Daten-

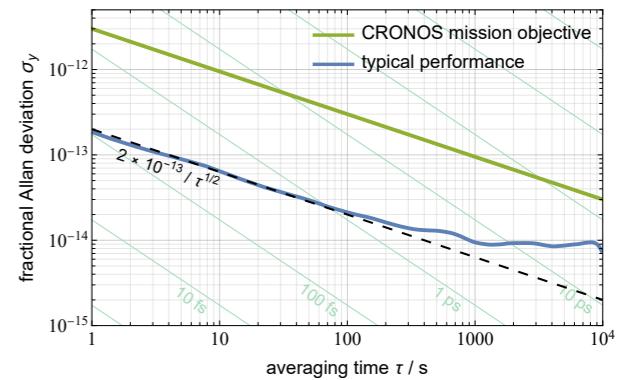


Fig. 3. Typical fractional frequency instability over time for the laboratory setup of the optical oscillator.

netzen. Im Projekt CRONOS entwickeln Partner aus Forschung und Industrie die erste weltraumgestützte optische Uhr, die auf einem Kleinsatelliten im niedrigen Erdorbit eingesetzt werden soll.

Der Satellitenbus wird von der Technischen Universität Berlin gebaut, der optische Frequenzkamm kommt von der Menlo Systems GmbH. Am FBH entwickeln wir den optischen Oszillator, der auf einem mikrointegrierten Diodenlaser basiert. Dessen optische Frequenz wird auf einen Zwei-Photonen-Übergang in Rubidium stabilisiert. Dafür wird das Laserlicht in ein fasergekoppeltes Spektroskopiemodul mit einer Rubidium-Dampfzelle geleitet und das Fluoreszenzsignal der angeregten Atome verwendet, um die Frequenz des Diodenlasers zu stabilisieren. In Laboraufbauten haben wir bereits eine relative Frequenzinstabilität von  $1.5 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$  erreicht, was einer Zeitabweichung von lediglich 100 Femtosekunden pro Sekunde entspricht. Eine In-Orbit-Verifikation der CRONOS Uhr ist für den Zeitraum 2027 bis 2028 geplant.

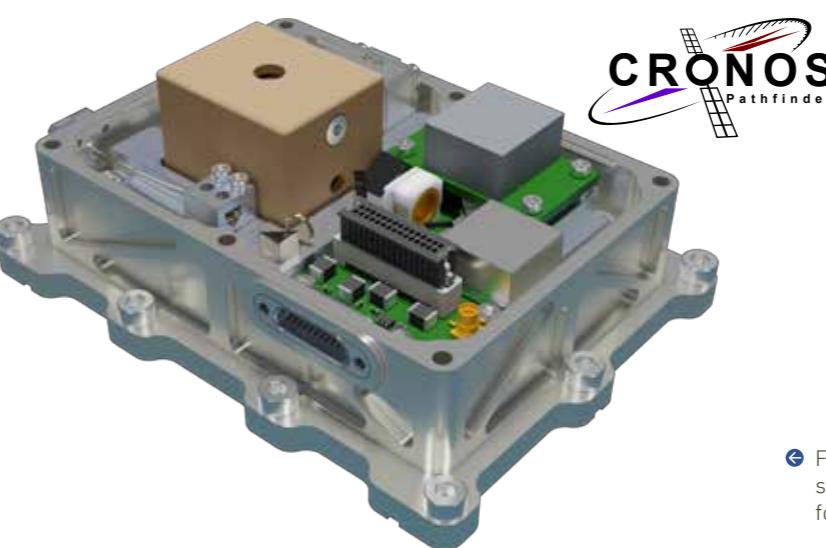


Fig. 4. CAD rendering of the rubidium two-photon spectroscopy module (120 mm x 90 mm x 51 mm) for the CRONOS payload.

# Chip-integrated solution based on diamond NV centers – enabling compact magnetic field cameras with simplified measuring principle

To date, 'cameras' that record images of weak magnetic fields are complex and expensive. Moreover, they often operate at cryogenic temperatures or involve moving components to scan across a sample, which makes integration into hand-held devices impossible. Magnetic field cameras are relevant for medical diagnostics such as magnetoencephalography used to measure brain activities, and in life science research to gain insights into neural processes. The ability to record a 'film' of action potentials propagating through nerves, for example, is a long-desired research goal [1].

In a collaboration between HU Berlin, Fraunhofer HHI, and FBH, we have developed a novel, fully fiber-packaged mobile quantum

sensor operating at ambient conditions to image magnetic fields and to spatially resolve 2D magnetic field gradients. The sensor employs a  $1.4 \times 1.4 \times 0.2 \text{ mm}^3$  diamond substrate, which contains nitrogen vacancy (NV) centers and is embedded in a polymer-on-silicon platform. A matrix of magnetic field-sensitive pixels is defined within the diamond substrate by green pump laser beams at a wavelength of 532 nm, intersecting perpendicularly with infrared laser beams at a wavelength of 1042 nm (Fig. 1). Individual pixels ( $i, j$ ) are addressed by activating the pump beam in row  $i$  and the infrared beam in column  $j$ . Active pixels absorb infrared light depending on the magnetic field to be probed and the frequency of a microwave field delivered to the pixels by microwave inductor lines (infrared absorption optically

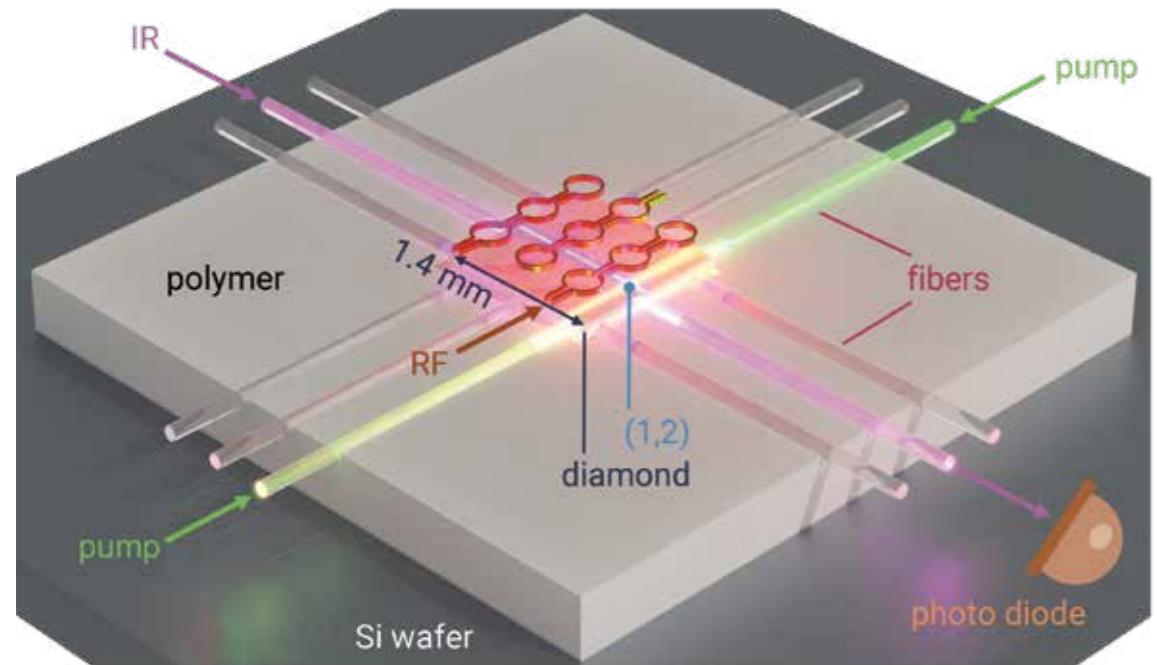


Fig. 1. Chip-integrated magnetic field multi-pixel sensor setup. The diamond substrate is embedded in the polymer-on-silicon platform. Fibers interfacing the diamond at either side deliver 532 nm pump and 1042 nm infrared light for infrared transmission measurements. Beam intersections define the sensor pixels ( $i, j$ ). Exemplarily, pixel (1,2) is addressed in the image. Microwave inductor lines (RF) drive NV spin-flip transitions for IRA-ODMR.

detected magnetic resonance, IRA-ODMR) [2]. Thus, the infrared absorption within the individual pixels is measured with a photo diode to derive the local magnetic field at each pixel. Subsequent readout of all pixels enables magnetic field imaging.

To demonstrate the multi-pixel sensor's potential, we have placed a current-driven solenoid coil above pixel (3,3). The coil generates a magnetic field, which we simulate and record with our sensor (Fig. 2). The measured field is highest around pixel (3,3), where the coil is located. Moving away from this pixel, the measured field decays in accordance with the coil's simulated field. Comparing the measured with the simulated magnetic field allows to retrieve the sensor position relative to the coil (blue crosses in Fig. 2 denote the retrieved sensor pixel positions). The close match between the experimental configuration and the reconstructed sensor position proves the sensor's capability to localize magnetic objects.

In the future, the sensor will be integrated into a wearable device, which can be attached to the skin. We foresee applications for the magnetic field camera not only in medical diagnostics but also in lab-on-a-chip devices for drug discovery [3], possibly reducing the amount of animal experiments. Furthermore, the sensor can be integrated into lithium ion batteries to monitor and develop them further [4] as demanded by sustainable electromobility.

Nervenzellen übermitteln Reize durch sogenannte Aktionspotentiale, die schwache Magnetfelder erzeugen. Um diese abzubilden, kommen bislang äußerst teure und komplexe „Kameras“ zum Einsatz. Diese werden beispielsweise in der medizinischen Diagnostik bei der Magnetoenzephalografie genutzt, um die Gehirnaktivität zu messen.

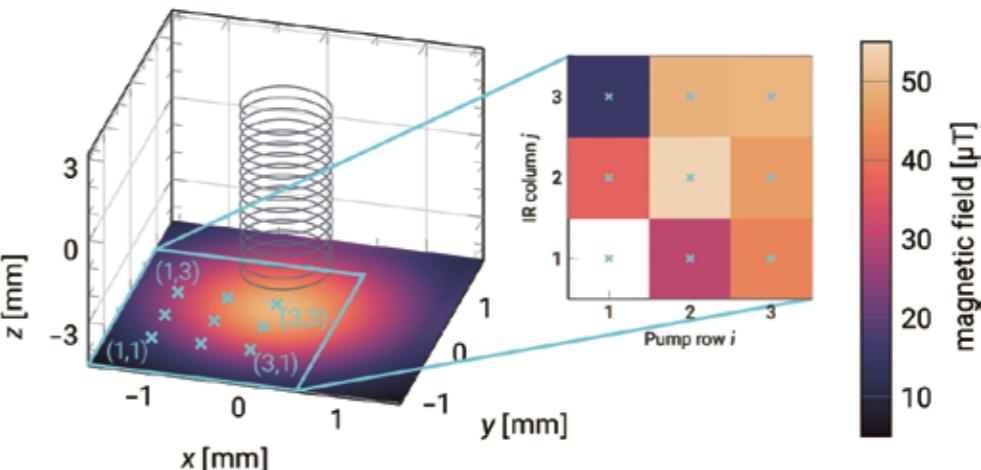
Unsere Wissenschaftler\*innen im Joint Lab Diamond Nanophotonics haben in Kooperation mit dem Fraunhofer HHI eine Magnetfeldkamera entwickelt, die auf einem neuartigen, deutlich vereinfachten Messprinzip basiert: In einem Diamantchip kreuzen sich grüne Pump- und infrarote Messlaserstrahlen. Jeder Kreuzungspunkt definiert ein Kamerapixel. Je nach angelegtem Magnetfeld wird mehr oder weniger Infrarotlicht im Diamant absorbiert, was detektiert werden kann. Eine Probe, deren Magnetfeld ortsaufgelöst vermessen werden soll, wird auf den Diamantchip gelegt. Perspektivisch kann der Sensor deshalb für medizinische Zwecke auf die Haut geklebt werden. Die Magnetfeldkamera arbeitet bei Raumtemperatur und lässt sich kompakt in ein tragbares Gerät integrieren. Neben der Anwendung im medizinischen Bereich können damit auch Batterien für die grüne Mobilitätswende weiterentwickelt werden.

## Publications

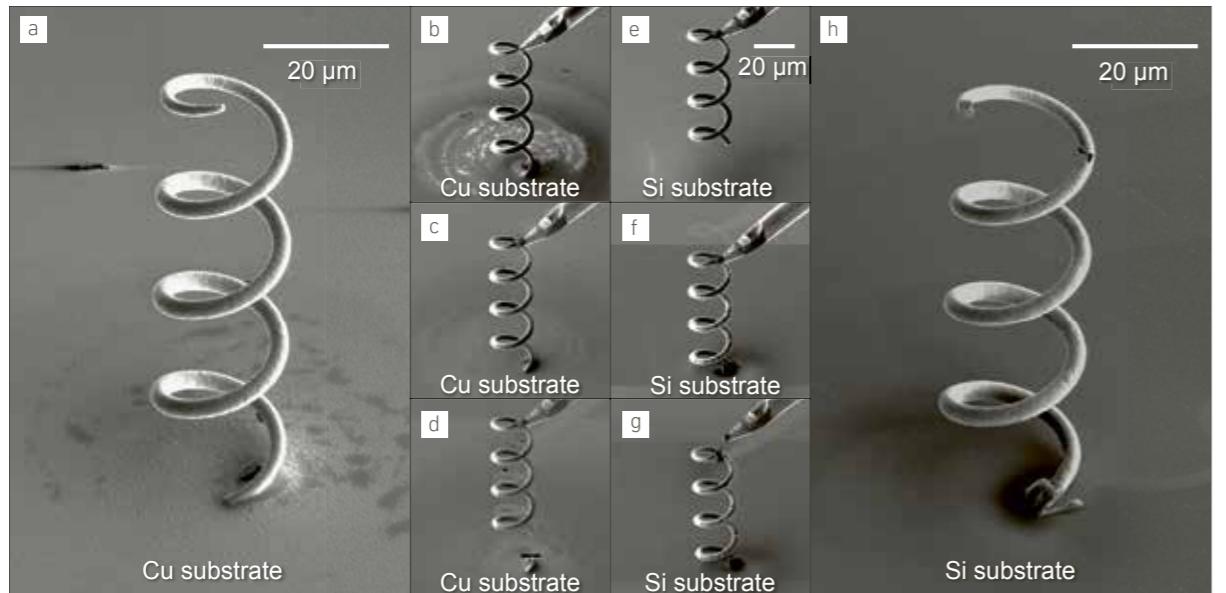
J. M. Bopp, H. Conradi, F. Perona, A. Palaci, J. Wollenberg, T. Flisgen, A. Liero, H. Christopher, N. Keil, W. Knolle, A. Knigge, W. Heinrich, M. Kleinert, T. Schröder, "Diamond-on-chip infrared absorption magnetic field camera", <https://arxiv.org/abs/2401.00854v1>

T. Schröder, F. Perona, J. M. Bopp, M. Kleinert, H. Conradi, US patent US11171976B2 (2023), EU patent application EP409041A1 (2021).

Further references:  
[1] J. L. Webb *et al.*, Sci. Rep. 11, 2412 (2021)  
[2] V. M. Acosta *et al.*, Appl. Phys. Lett. 97, 174104 (2010)  
[3] R. D. Allert *et al.*, Lab Chip 22, 4831–4840 (2022)  
[4] M. G. Bason *et al.*, J. Power Sources 533, 231312 (2022)



A solenoid coil (gray spiral) located above pixel (3,3) generates a magnetic field. Its simulated magnetic field's absolute value is depicted color-coded. The inset displays the magnetic field measured with the multi-pixel sensor. Pixel (1,1) is excluded due to an insufficient signal-to-noise ratio.



↑ Fig. 1. Pick-and-place transfer process of microprinted helical antennas: a) copper (Cu) helical antenna, fabricated by electrodeposition on Cu substrate. b) The micromanipulator approaches and c) is welded to the antenna tip. d) The antenna base is cut, and the antenna is e) transferred and f) welded to a silicon (Si) substrate. g) After cutting the connection to the manipulator, h) the helical antenna is depicted on the Si substrate.

## From micro to nano: 3D printing of metallic structures using electrodeposition and direct electron beam writing

Micro- and nanofabrication of metallic structures are essential to develop novel chip-based device concepts in micro-electronics and photonic quantum technologies. However, conventional lithographic processes face limitations when dealing with truly three-dimensional structures, such as free-standing wire bonds and helical antennas. To overcome this challenge, we employ different methods for direct 3D printing, e.g., based on electrodeposition and direct electron beam writing. These methods overcome constraints of inherently 2D patterning technologies and provide access to free-standing metallic structures ranging from micro- to nanoscale.

Electrochemical 3D printing relies on confined electrodeposition of a metal electrolyte locally ejected from a printing nozzle with a size in sub-micron range. The technique allows fabrication of gold and copper 3D structures with dimensions from several micrometers to the sub-millimeter level such as the helical copper antenna depicted in Fig. 1a. However, the substrate acts as working electrode and must therefore have a high conductivity, hindering direct growth especially onto electronic chip architectures. The problem can be solved by a pick-

and-place method in a dual-beam instrument employing focused electron and ion beams for imaging and processing. Figs. 1b-g show the corresponding workflow using a micromanipulator whose tip is locally welded to the helical antenna. After the base of the antenna has been cut off by focused ion beam milling with gallium ions, it can be brought to a desired position on the target chip. Finally, the base is welded to the surface and the connection to the micromanipulator is cut. Fig. 1h shows the copper antenna, successfully transferred from a copper substrate to a silicon chip. This technology can be employed for applications in high-speed wireless and optical communication such as 3D inductors and antennas allowing for more design flexibility as well as a higher quality factor with less parasitic losses. It can also be used in interconnects where bond-wire-like structures can be transferred to electrically connect more than one circuit module with one another.

Even smaller geometries are required in the optical domain. Sub-micron metal structures can exhibit strongly resonant modes based on the collective excitation of the free electron gas by visible light incidence. These plasmon-polariton modes

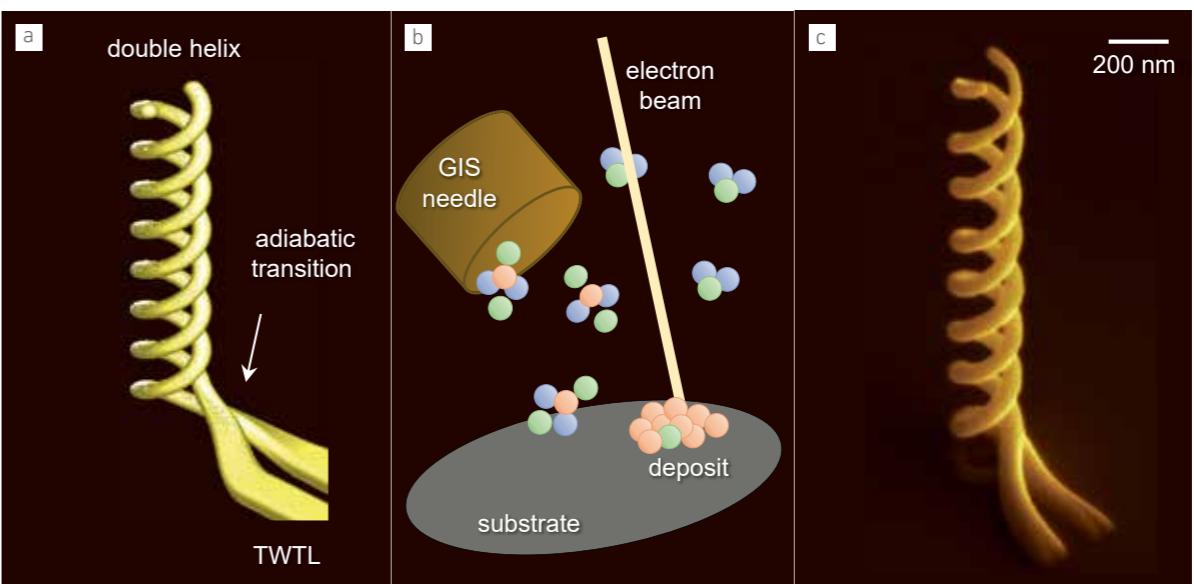
allow for the localization of light beyond the diffraction limit. One intriguing application of such 3D plasmonic structures comprises polarization control at the nanoscale. Figs. 2a and b depict a plasmonic polarization transducer that converts linearly into circularly polarized light and vice versa on a sub-micrometer footprint. This device combines a two-wire transmission line for guiding highly confined linearly polarized light with a double helical antenna, which exhibits strongly directional emission of circularly polarized light. The transition region between waveguide and antenna was optimized by a particle-swarm algorithm embedded into a finite difference time-domain (FDTD) model to ensure adiabatic mode transformation.

Fabrication of such structures relies on 3D printing with focused electron beams. As with the aforementioned welding process for the pick-and-place method, beams of charged particles can be used to locally dissociate precursor gas molecules, as illustrated in Fig. 2c. In the case of electrons, this process is called focused electron beam induced deposition (FEBID), capable of achieving sophisticated geometries with structural features below 50 nm. We have developed specific patterning routines based on Python programming to control the nonlinear growth processes by defining the beam path and the rasterization strategy. Figs. 3d and e depict a directly written gold double-helical antenna according to the modelled design. Ongoing efforts are directed towards further optimizing the manufacturing for helical antennas of either scale, characterization of the transducer is currently being prepared. This work is funded by the German Research Foundation (DFG) within the project 'chiralFEBID' under grant no. HO 5461/3-1.

Die Mikro- und Nanofabrikation metallischer Strukturen ist unverzichtbar, um chipbasierte Bauelemente in Elektronik und Quantentechnologie zu entwickeln. Bei dreidimensionalen Geometrien stoßen herkömmliche Lithographie-Verfahren jedoch an ihre Grenzen, weshalb wir neuartige 3D-Druckverfahren verwenden. Mithilfe der lokalisierter Elektroabscheidung auf einem leitfähigen Substrat lassen sich 3D-Strukturen mit Größen von nur wenigen Mikrometern herstellen. Diese Strukturen können mithilfe der Pick-and-Place-Methode direkt auf elektronische Chip-Architekturen transferiert werden, um beispielsweise als Helixantennen in der drahtlosen Kommunikation eingesetzt zu werden. Um sichtbares Licht zu kontrollieren und zu lokalisieren, werden sogar noch kleinere Geometrien benötigt. Wir haben einen Polarisationswandler entwickelt, der lineares in zirkular polarisiertes Licht auf einer Fläche von weniger als einem Quadrat-Mikrometer umwandelt. Seine Herstellung basiert auf dem direkten Schreiben mit fokussierten Elektronen, das genau an der gewünschten Stelle auf dem Chip erfolgen kann.

### Publication

I. Utke, P. Swiderek, K. Höflich, K. Madajka, J. Jurczyk, P. Martinović, I. B. Szymańska. Coordination and organometallic precursors of group 10 and 11: Focused electron beam induced deposition of metals and insight gained from chemical vapour deposition, atomic layer deposition, and fundamental surface and gas phase studies. *Coordination Chemistry Reviews*, 458, 213851. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213851>



↑ Fig. 2. Plasmonic polarization transducer: a) 3D geometry of the optimized transition region, b) scheme of the FEBID technique, in which organometallic precursor molecules are supplied by a gas injection system (GIS) and dissociated by a focused electron beam. c) Double-helical antenna with the adiabatic transition region fabricated by FEBID.

# III-V Electronics

## III/V-Elektronik

The overall target of FBH's research activities in the field of III-V electronics is to push the limits of electronic devices in terms of efficient power generation at high frequencies, high voltages, and short switching times. The frequency spectrum ranges from high-speed power electronics through the mobile communication bands in the lower GHz range to sub-millimeter waves.

This way, we offer new solutions for the steadily growing needs of wireless communications (5G, 6G, ...), radar sensing, as well as efficient power converters. Energy efficiency to reduce the carbon footprint is a cross-sectional goal for these developments. All activities are based on III-V semiconductor technology; they presently encompass the following major subjects:

> **Microwave power amplifiers based on GaN** for the use in space applications and base stations for mobile communications – the focus is on concepts improving energy efficiency (load and supply modulation, envelope tracking) and on reconfigurable amplifiers.

> **Novel digital architectures for power amplifiers**, based on high-speed and efficient switching of transistors – this concept bridges the gap to power electronics and allows for maximum flexibility as well as compactness when realizing components for the infrastructure of future mobile communication networks from sub-6 GHz to 300 GHz (5G/6G).

> **Terahertz components & systems** – the focus is on integrated circuits up to the 300 GHz band so far, using indium phosphide (InP) bipolar transistors (HBTs). A triple-mesa process is applied including an InP-on-BiCMOS hetero-integration option on wafer level. With these circuits, compact integrated frontend-modules for radar, sensor, and communication systems can be realized, e.g., for 6G applications in D-band.

> **THz detectors** – they demonstrate device operation well beyond the classical frequency limits and thus open up possibilities for electronic components in the 1 THz range. We employ GaN as well as InP transistors for these developments in array configuration.

> **Lateral and vertical GaN-based switching transistors & Schottky diodes for high voltages** – for high-efficiency power converters with high clock speed, low weight, and volume. They are well-suited for a great variety of applications, e.g., in the field of electro-mobility.

> **Laser drivers** – GaN transistors are also used to develop high-speed high-current drivers for laser diodes that are integrated with FBH laser diodes to realize pulse laser sources, e.g., for LiDAR applications.

> **Investigating transistors based on new wide-band-gap materials**, such as AlN and  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  – for power electronics as well as microwave frequencies.

Besides using the III-V semiconductor fabrication capabilities, these research activities rely on our expertise in advanced simulation, modelling, circuit design, and characterization.

Das übergreifende Ziel der Forschungsarbeiten des FBH im Bereich III/V-Elektronik ist, die Grenzen der elektronischen Bauteile hinsichtlich effizienter Leistungserzeugung bei hohen Frequenzen, hohen Spannungen und kurzen Schaltzeiten systematisch zu erweitern. Das Spektrum reicht von schneller Leistungselektronik über die Mobilfunkfrequenzen im unteren GHz-Bereich bis hin zu Sub-Millimeterwellen.

Dadurch stellen wir neue Lösungen für die stetig steigenden Anforderungen in der drahtlosen Kommunikation (5G, 6G, ...), der Radarsensorik und bei effizienten Leistungswandlern bereit. Ein Querschnittsthema dabei ist die Energieeffizienz und damit die Verbesserung des  $\text{CO}_2$ -Fußabdrucks der Systeme. Alle Aktivitäten basieren auf der III/V-Halbleitertechnologie. Sie umfassen derzeit hauptsächlich die folgenden Themen:

> **HF-Leistungsmodule auf Basis von GaN** für den Einsatz in Raumfahrt und Mobilfunk-Basisstationen – der Schwerpunkt liegt auf Konzepten zur Verbesserung der Energieeffizienz (Last- und Versorgungsspannungsmodulation, Envelope Tracking) und auf rekonfigurierbaren Verstärkern.

> **Neue digitale Architekturen für Leistungsverstärker**, die auf schnell und effizient schaltenden Transistoren beruhen – dieses Konzept schlägt die Brücke zur schnellen Leistungselektronik und erreicht maximale Flexibilität und Kompaktheit. Im Fokus liegen Komponenten für die Infrastruktur der zukünftigen Mobilkommunikations-Netzwerke, vom Frequenzbereich unter 6 GHz bis 300 GHz (5G/6G).

> **Terahertz-Komponenten & -Systeme** – der Schwerpunkt liegt auf integrierten Schaltungen mit Indiumphosphid (InP) Heterobipolartransistoren (HBTs), derzeit bis zum 300 GHz-Band. Dabei kommt ein Triple-Mesa-Prozess zur Anwendung, der auch die Option einer InP-auf-BiCMOS-Heterointegration auf Waferebene beinhaltet. Damit können kompakte integrierte Frontend-Module für Radar-, Sensor- und Kommunikationssysteme realisiert werden, z.B. für 6G-Anwendungen im D-Band.

> **THz-Detektoren** – diese demonstrieren die Funktion von Transistorstrukturen weit oberhalb der klassischen Grenzfrequenzen im 1 THz-Bereich. Wir verwenden dazu GaN- und InP-Transistoren in Array-Anordnungen.

> **Laterale und vertikale GaN-basierte Schaltransistoren & Schottky-Dioden für hohe Spannungen** – für hocheffiziente Leistungs-Umrichter mit hoher Taktrate, geringem Gewicht und Volumen. Damit eignen sie sich für vielfältige Anwendungen, u.a. im Bereich Elektromobilität.

> **Lasertreiber** – GaN-Transistoren werden auch eingesetzt, um schnelle Hoch-Strom-Treiber zu realisieren, die mit Laserdioden aus dem FBH zu Pulsquellen integriert werden, z.B. für LiDAR-Anwendungen.

> **Transistoren auf Basis neuer Materialien mit großer Bandlücke** wie AlN und  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  – für Anwendungen von der Leistungselektronik bis zum Mikrowellenbereich.

Neben der III/V-Halbleitertechnologie bieten wir die für diese Forschungsarbeiten nötige Expertise bei Simulation, Modellierung, Schaltungsdesign und Charakterisierung.

# Intelligent RF power amplifier systems based on supply and load modulation

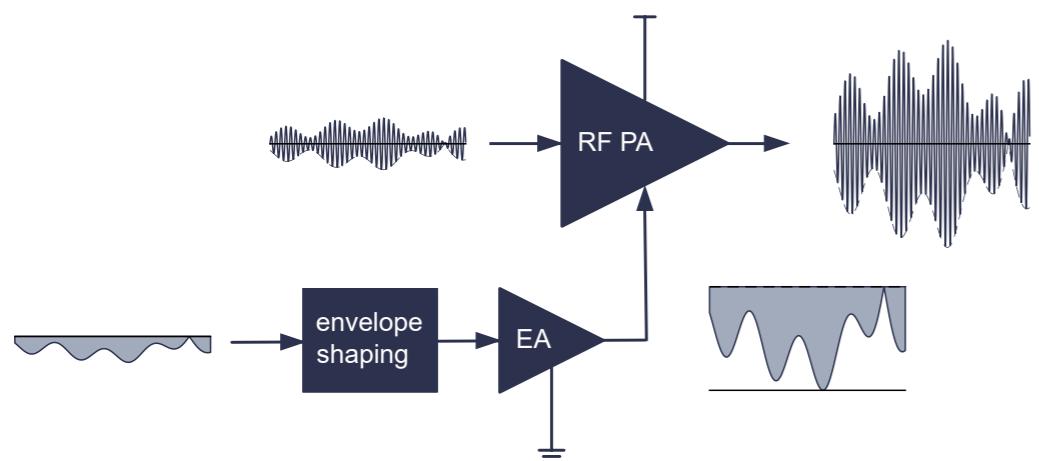


Fig. 1. Topology of a reverse-type ET system.

RF power amplifiers (PAs) are widely used in terrestrial and space applications, for example, as part of the transmitter for wireless communication and radar systems. They are designed to meet certain specifications, including power, efficiency, and linearity under specific system conditions like temperature and signal properties. Their performance is verified for signals that are typical for the intended application to meet system requirements and comply with government regulations for a certain frequency band and standard. The overall performance is governed by the PA design and fixed once the PA is fabricated.

Modern wireless communication systems use complex wide-band-modulated signals to achieve high data transfer rates. These have a time-varying amplitude with large differences between the instantaneous peak and the average power levels. Special types of PAs that are designed to work efficiently with such signals include the load-modulated (LM) and supply-modulated (SM) PAs. They achieve an increased power back-off efficiency by dynamically varying either the load or the supply voltage with the instantaneous power of the signal. The separate load or supply voltage control also provides an additional degree of freedom to change the properties of the amplifier after fabrication. Such systems have been the focus of research in the RF Power Lab at FBH the past 15 years.

One type of supply modulation is the so-called envelope tracking (ET) technique, in which the PA supply voltage is dynamically adapted to the instantaneous signal level. In principle, the

idea is to dynamically increase the voltage over the PA when a large signal is amplified and reduce it when the power goes down. This allows the PA to work constantly in saturation and hence very efficiently. The topology of a reverse-type ET system is shown in Fig. 1, whereby "reverse" means that the PA supply voltage is modulated by the envelope amplifier (EA) on the low side. The separate input for the EA makes it possible for us to dynamically find alternative combinations of envelope amplitude and supply voltage and thus to adapt the PA behavior to different requirements. If the PA is equipped with sensors that can identify the state of the PA, the information from these sensors can be used to change the properties of the PA. This can be done by selecting a different combination of input envelope amplitude and supply voltage. We investigate this now in a project called CAMEL: Conforming mm-wave Amplifier based on MachinE Learning. The project is being carried out together with Prof. Daniel Rönnow from the University of Gävle, Sweden. First tests are conducted on an L-band breadboard reverse-type ET system, which targets space applications and is shown in Fig. 2 [1].

This system is now being equipped with sensors that can monitor the inner state of the PA by measuring different inner temperatures, the dynamic current, and the EA output voltage. Additional external sensors are added to measure, e.g., the band-limited input and output powers to analyze their spectral distribution. Environmental changes are monitored by measuring the ambient and baseplate temperatures and possible reflections coming from the output.

By characterizing the PA's nonlinear dynamic transfer function ( $H$ ) using complex-modulated signals it is possible to identify mathematical models of the PA's behavior over specific frequency bands and amplitude ranges. The dual-input reverse-type ET system is more complex than a normal PA. This is because the output signal at sample  $n$ ,  $y(n)$ , is a function of both the complex-valued modulated carrier  $x(n)$  and the real-valued dynamic supply voltage  $u(n)$ . In the project, built-in sensors enable to identify the model parameters' dependence on temperature and the state of the PA, which is contingent on the signal's bandwidth and crest factor. Machine learning will subsequently be implemented to use the sensor data to achieve optimum performance for a specific signal by dynamically controlling  $u(n)$  as illustrated in Fig. 3. The final goal is to implement the algorithms in an embedded system.

The project itself is financed in-house but the ET hardware is based on a system partly developed together with European Space Agency through the contract "Improved Envelope Tracking Systems Based on VHF Switching Converter and RF Amplifier" under contract 4000114371/15/NL/LvH.

HF-Leistungsverstärker (PAs) sind sowohl in terrestrischen als auch in Weltraumanwendungen weit verbreitet. Sie werden unter anderem als Teil des Senders für drahtlose Kommunikations- und Radarsysteme eingesetzt. In unserem aktuellen Projekt CAMEL erforschen wir gemeinsam mit Prof. Daniel Rönnow von der Universität Gävle, Schweden, die Eigenschaften derartiger HF-Leistungsverstärkersysteme mittels integrierter Sensorik. Diese Eigenschaften wollen wir dynamisch erfassen und an sich ändernde Systemanforderungen oder Umgebungsbedingungen anpassbar machen.

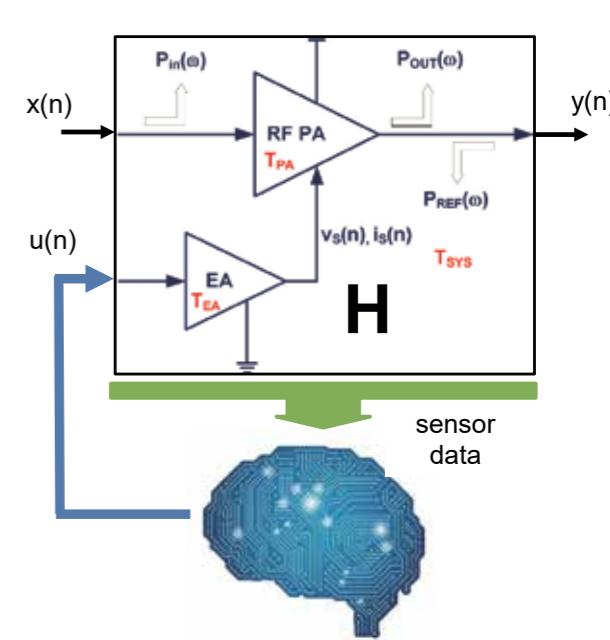


Fig. 3. Illustration of the sensorics and modelling of the machine-learning-based control of the intelligent PA.

Am Beispiel eines versorgungsmodulierten Systems für Raumfahrtanwendungen im Bereich des L-Bandes modellieren und optimieren wir das Zusammenspiel einzelner Systemparameter, wie etwa Versorgungsspannung und Signalleistung. Ziel des Projektes ist es, maschinelles Lernen in ein eingebettetes System zu implementieren, um die Verstärkereigenschaften anzupassen.

## Publication

S. Paul, N. Wolff, T. Kuremyr, C. Delepaup, V. Valenta, W. Heinrich, O. Bengtsson, "A Compact L-Band Reverse-Type Envelope Tracking System," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., <https://www.x-mol.net/paper/article/1761280903833423872>

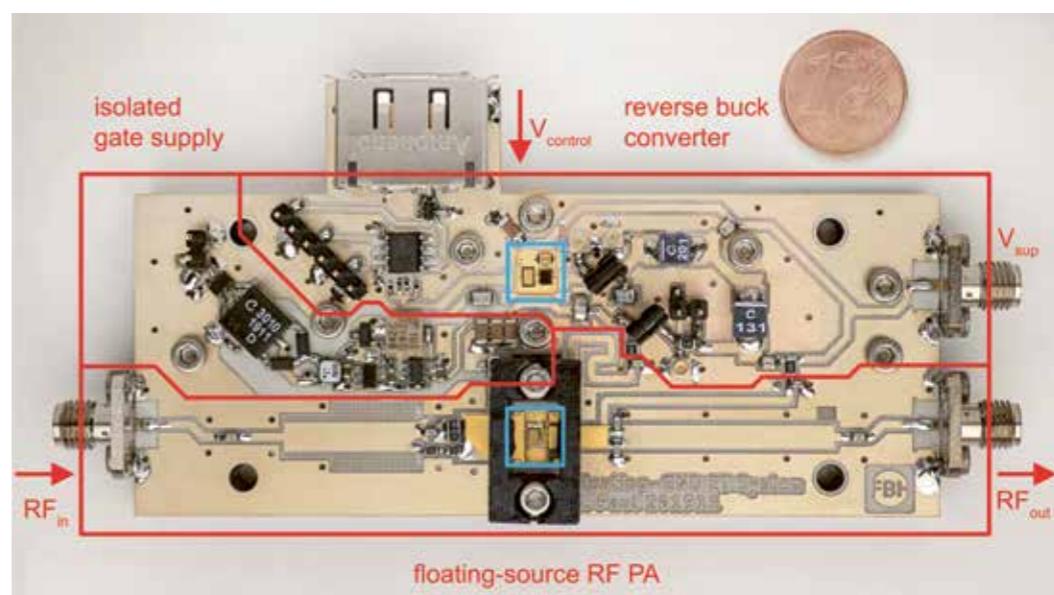


Fig. 2. Photo of the reverse-type ET system for L-band space applications.

# A combined TCAD — compact model approach for comprehensive investigation of trap impact on GaN HEMT performance

In recent years, industrial activities related to electronic applications of nitride semiconductors have focused on optimizing the performance of gallium nitride (GaN) high-electron-mobility transistors (HEMTs). One significant challenge during this process is electron trapping – an unfavorable phenomenon where electrons become captured in bound states within the band gap, resulting in a reduced output current. This trapping can occur in multiple regions of a transistor, including upper semiconductor layers, as well as surface or bottom layers such as the buffer.

At FBH, we utilize various characterization and modeling techniques to analyze these complex phenomena and thus optimize our GaN HEMTs as part of the joint activities with BTU Cottbus-Senftenberg. For this purpose, we have developed a novel approach that combines technology computer-aided design (TCAD) and compact modeling. This integrated method allows us to directly investigate the impact of traps on measured power-added efficiency (PAE) and output power.

TCAD simulations are initially employed to investigate the locations of traps and their actual impact on device behavior. In Fig. 1, a schematic of a GaN HEMT illustrates the main locations of trapped electrons, as analyzed by TCAD. To achieve high electron confinement and suppress short channel effects, foundries have developed back barriers in AlGaN/GaN heterostructures by incorporating carbon (C) or iron (Fe) atoms during growth. In our case, we utilize a GaN:Fe buffer for the back barrier. However, Fe atoms create acceptor-like trap states. TCAD revealed that the buffer electron trapping caused by Fe is strongly localized in an area under the gate as shown in Fig. 1, leading to a positive threshold voltage ( $V_{th}$ ) shift. Furthermore, our analysis indicates that a significant portion of the current reduction arises from the surface, particularly the interface between silicon nitride (SiN) and the GaN cap layer, as also illustrated in Fig. 1. In Fig. 2, two cases of the calculated electron density along the channel are presented. One case involves no surface traps, considering only buffer traps in our analysis, while the other incorporates both types of traps. When surface traps are filled with electrons, they alter the charge balance of the heterostructure, depleting a portion of the 2DEG beside the gate and increasing drain resistance. These phenomena result in the well-known knee walkout.

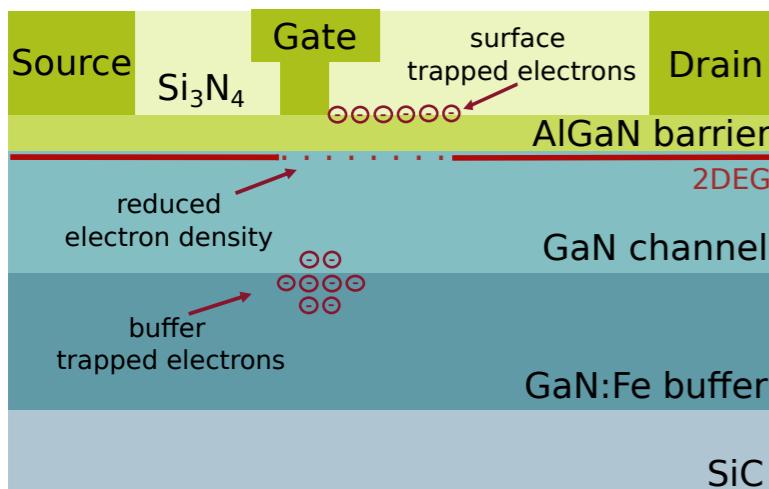


Fig. 1. Schematic of a GaN HEMT and the location of surface and buffer trapped electrons as analyzed by TCAD. The result is a reduced electron density in the channel.

While these effects have been well-known for many years, their actual impact on microwave power performance was not thoroughly presented until now. To address this, TCAD-created data was utilized and delivered to an accurate compact model for RF large-signal analysis. In Fig. 3, we present simulation and measured results of gain, PAE, and output power versus input power at 20 GHz. Our novel modeling method allows us to unveil the impact of each trap separately.

It is observed that buffer traps are responsible for gain variation at moderate RF power levels, while surface traps significantly reduce the maximum output power and PAE. This approach not only reveals the specific contributions of each trap but also guides foundries in determining the direction for maximum possible improvement. Additionally, it can be employed to directly study the impact of other physical effects and design optimization steps on the power performance of GaN HEMTs.

The German Research Foundation (DFG) has financially supported this work under grant no. 440549658, and the German Ministry of Education and Research (BMBF) under the project reference 16FMD02 (within Research Fab Microelectronics Germany, FMD).

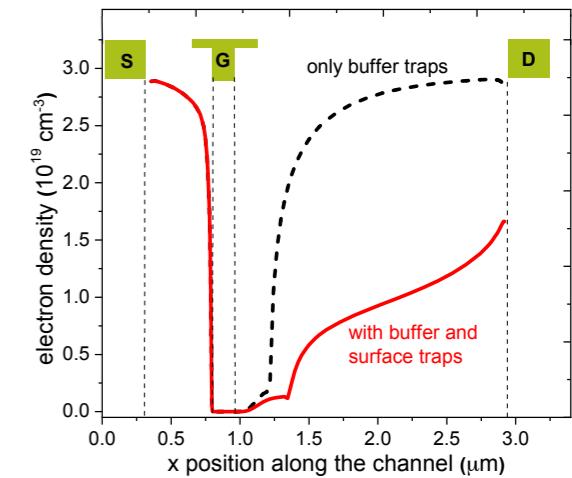


Fig. 2. TCAD-extracted electron density along the channel with surface and buffer traps, and with only buffer traps included. The electron depletion caused by the surface traps is evident.

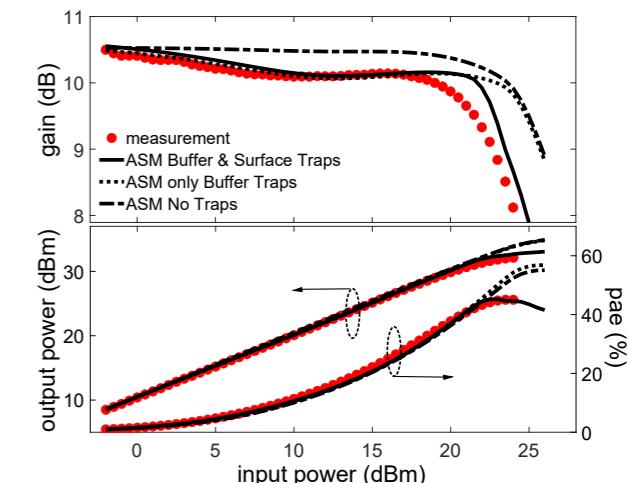


Fig. 3. Simulation results of the compact model and measurements of gain, output power, and PAE vs. input power at 20 GHz for  $I_{DSQ} \approx 0.05 \times I_{DSS}$  and  $V_{DS} = 20$  V.

Um das Verhalten von Halbleiterbauelementen detailliert analysieren und verstehen zu können, nutzen wir die physikalische numerische Simulation (TCAD). Bei GaN-HEMTs verursachen tiefe Störstellen Memory-Effekte, die eine besondere Herausforderung darstellen. Für eine realistische Simulation des nichtlinearen Hochfrequenzverhaltens – wie etwa der Leistungsverstärkung –, müssen wir auf einer sehr schnellen Zeitskala simulieren, um das Mikrowellen-Signal abzubilden. Zugleich müssen die längeren Zeitkonstanten der Memory-Effekte berücksichtigt werden, die um viele Größenordnungen höher sind. Dies ist mit heutiger Rechentechnik nicht möglich.

Unser innovativer Ansatz nutzt TCAD als Grundlage für die Ableitung eines physikalisch basierten kompakten Modells, das dann zur nichtlinearen Simulation eingesetzt wird. Dazu haben wir dieses Modell um eine physikalische Beschreibung der Memory-Effekte erweitert. Dies zeigen wir beispielhaft an der Implementierung und Analyse von tiefen Störstellen an der HEMT-Oberfläche.

## Publications

- P. Beleniotis, C. Zervos, S. Krause, S. Chevtchenko, D. Ritter, M. Rudolph, "Investigation of Traps Impact on PAE and Linearity of AlGaN/GaN HEMTs Relying on a Combined TCAD - Compact Model Approach", IEEE Transactions on Electron Devices, <https://m.x-mol.net/paper/detail/1782970093200125952>, 2023.1028955

- C. Zervos, P. Beleniotis, S. Krause, D. Ritter, M. Rudolph, "The role of gate leakage on surface-related current collapse in AlGaN/GaN HEMTs", 18<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Berlin, Germany, pp. 297-300, <https://doi.org/10.23919/EuMIC58042.2023.10289036>

# Optimized transistor technology and materials for sub-THz 6G applications

InP-based heterojunction bipolar transistors (HBTs) offer the most suitable technological solution for high-frequency applications in the sub-THz regime. This spans a wide range of applications, from sensing and internet of things to wireless communication and 6G. All of these applications require transistors with maximum oscillation frequencies ( $f_{max}$ ) well above 300 GHz. To achieve such high  $f_{max}$ , transistor parasitic including access resistance and capacitance has to be drastically reduced. This requires to scale down the transistor size to sub-micron dimensions as well as to improve the quality of ohmic resistances and passivation of these transistors.

New processing techniques needed to be developed to accommodate these challenging scaling requirements. We structured the critical layers using electron beam lithography with an alignment resolution of sub 20 nm. This enabled us to pattern highly symmetrical base contacts and a centered collector on the emitter. To increase the yield and lower the contact resistance, we

applied an etch-back approach for the emitter structuring process. This process is based on etching a titanium tungsten (TiW) alloy as emitter metal. TiW offers low metallic resistance as well as high thermal stability, thus achieving high-power capabilities. The resulting emitters possess a high aspect ratio, making them favorable for the planarization process while maintaining high transistor yield. Furthermore, the steep etching angle allows for the incorporation self-aligned techniques such as dielectric sidewall spacers. This, in turn, increases the yield and enhances the critical dimension control.

A fully processed transistor is depicted in Fig. 1. The transistor is processed in a standard triple mesa process incorporating silicon nitride (SiN) sidewall spacers along with gold posts on base and collector. Breakdown measurements of these processed transistors show excellent breakdown behavior. It therefore offers the capability of driving more current at higher voltages, with a maximum breakdown voltage of 5V (compared to 4.25V in the standard baseline process).

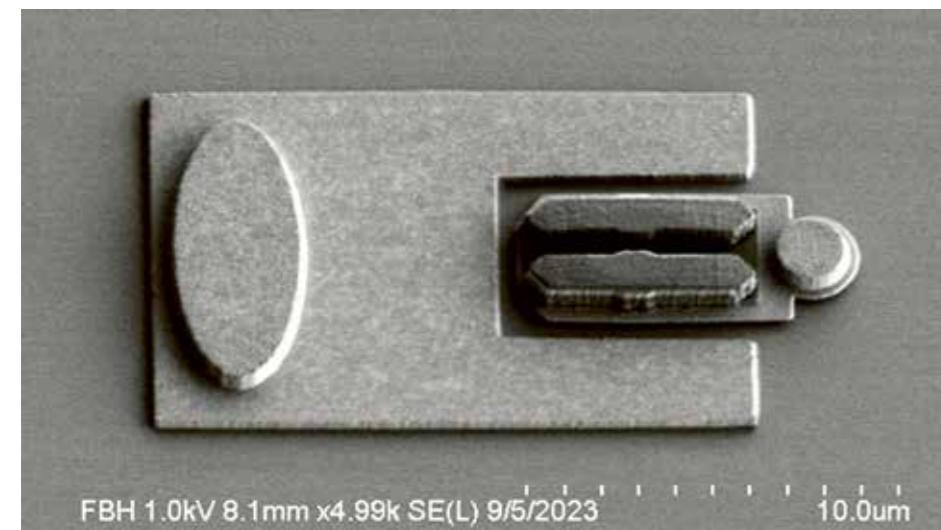


Fig. 1. Transistor realized with the new TiW etch-back emitter process.

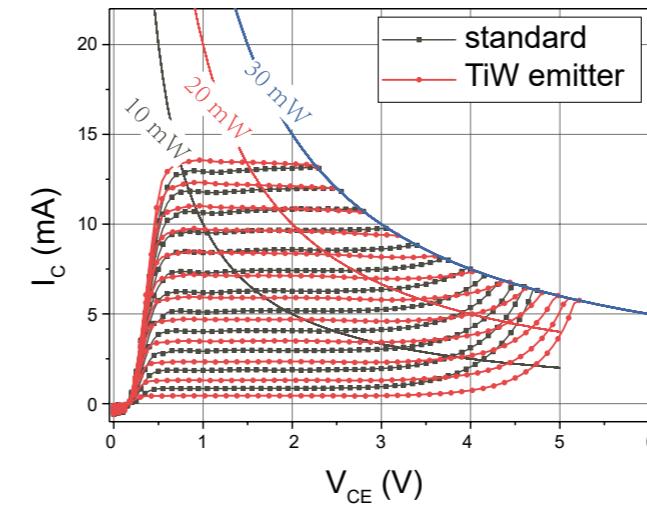


Fig. 2. Device breakdown measurements showing the difference between the standard baseline process and the new TiW-based emitter process.

Due to aggressive downscaling of the transistor node, the base access resistance becomes one of the factors that limit transistor performance. Also, controlling the mesa wet-etching process is critical. We achieved this through adopting a novel digital etching process. This process relies on self-limiting oxidizing and subsequent etching cycles with very low etching rates. The resulting process yields an etching control in the order of less than 2 nm, with wafer-to-wafer variation below 0.25 nm. This limits the over etching behavior which is normally seen in standard wet-etching processes. Fig. 3 shows comparative images between the two processes. Digital etching significantly reduces the access region, leading to distinctly lower base access resistance and a much higher  $f_{max}$ .

These activities have been funded by the German Ministry of Education and Research (BMBF) within the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) 6G-RIC project.

Heterojunction-Bipolartransistoren (HBTs) auf Indiumphosphid-Basis sind die ideale technologische Lösung für Hochfrequenzanwendungen im Sub-Terahertz-Bereich. Sie eignen sich für vielfältige Anwendungen, von der Sensorik und dem Internet der Dinge bis hin zur drahtlosen Kommunikation und 6G.

Am FBH haben wir Verarbeitungstechniken entwickelt, mit denen sich die Leistung dieser Transistoren deutlich verbessern lässt. Zudem ermöglichen die aufeinander abgestimmten Prozesse, den Transistorknoten im Sub-Mikrometer-Bereich zu skalieren. Unter anderem haben wir ein Emitter-Rückätzverfahren neu entwickelt, das auf Titan-Wolfram als Emittermetall basiert. Ein ebenfalls neu entwickelter digitaler Ätzprozess optimiert das Mesa-Ätzen. Die damit hergestellten Transistoren, die wir mit Elektronenstrahl-Lithographie bearbeitet haben, zeigen deutlich verbesserte elektrische Eigenschaften.

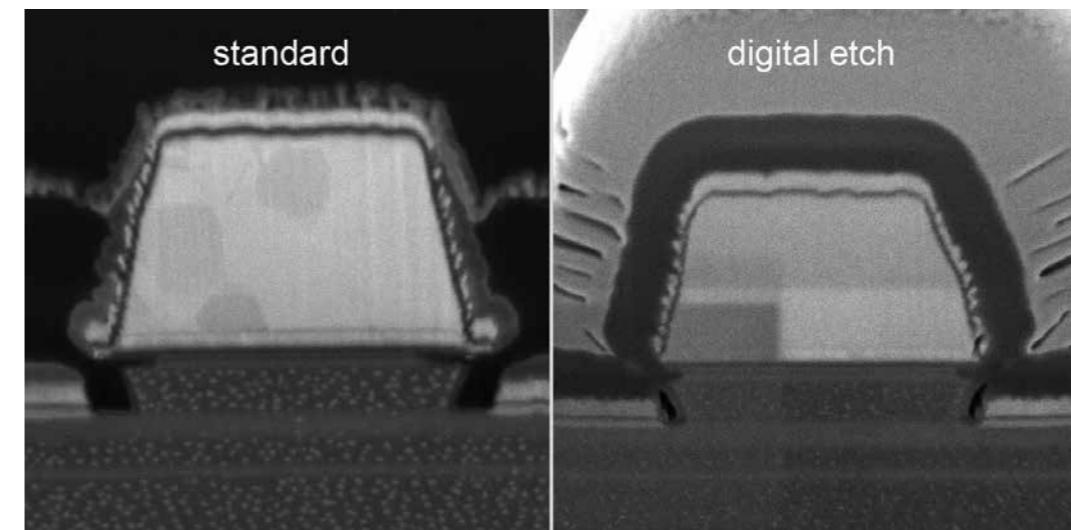


Fig. 3. SEM images showing the difference between the standard (left) wet-etching process and the digital etching process. The access region between the contacts is significantly reduced in digital etching.

# Efficient InP W-band rectifier MMICs for IoT applications and future green 6G networks

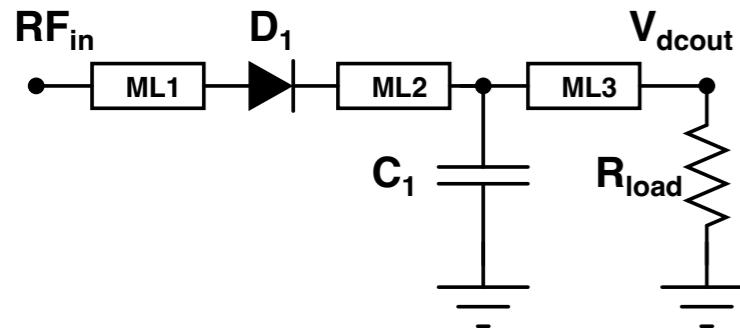


Fig. 1. Schematic of realized W-band rectifier.

The development of rectifier systems that operate in the W-band frequency range is of central importance for a variety of practical applications. These systems are particularly important for energy harvesting in the context of Internet of Things (IoT) devices. In addition, rectifiers operating at frequencies around 100 GHz are essential for wireless power transfer tasks such as those found in swarm robotics. Another interesting application area is the use of rectifiers for energy recovery to improve the energy efficiency of potential digital transmitter circuits in future 5G and 6G networks – a necessity for advanced energy-saving communication infrastructures. Digitizing the transmitter chains also makes a decisive contribution to saving CO<sub>2</sub> for future mobile communications.

By rectifying out-of-band power from the broadband spectrum of the digital signal and converting it to DC, this efficiently recovered energy can assist in powering digital power amplifier architectures. Such advances promise a significant increase in energy efficiency and pave the way for greener ICT networks of the future. Crucial to the success of these efforts is the development of highly efficient rectifier systems that meet the diverse requirements of these applications. Up to now, the realized W-band rectifiers are fabricated in GaAs or CMOS technologies. We have presented for the first time a sub-THz rectifier in InP

technology, applying our 0.85 μm triple mesa HBT process. The highly-efficient W-band single-diode rectifier MMIC contains a 2-finger p-n diode as core element for rectification and a shunted 3 pF capacitor. The diode is built by using the base-collector diode of a 2 × 0.85 μm × 6 μm InP-HBT. Moreover, no input matching for a certain frequency was applied in order to check broadband behavior and potential of the circuit. Including the input and output pads as well as microstrip lines, the remarkably compact chip is only as small as 360 × 260 μm<sup>2</sup>.

The sub-THz rectifier achieves a maximum power conversion efficiency (PCE) of 69% at 108 GHz with a load resistance of 50 Ω and input power of -1.5 dBm. For an input power of about 15 dBm, the circuit still reaches a conversion efficiency of 14% at a DC output power of 5 mW. For 200 Ω and 1 kΩ the achieved PCE is 12.2% and 6.7% at 15 dBm input power, respectively.

With these features, the designed InP W-band rectifier shows great potential for energy recovery circuits as well as an alternative for rectifiers in W-band wireless power transfer systems.

This work was funded by the German Research Foundation (DFG) under ref. WE 6288/2-1.

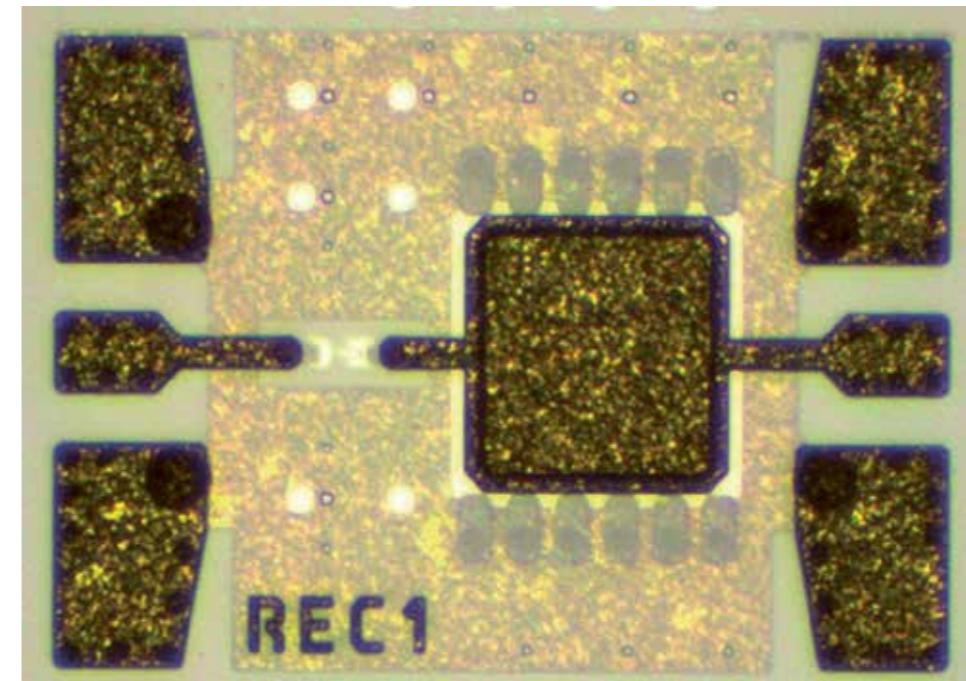


Fig. 2. Chip photograph of the realized W-band rectifier.

Die Entwicklung von Gleichrichtersystemen im Frequenzband von 75 – 110 GHz (W-Band) ist für zahlreiche praktische Anwendungen von großer Bedeutung. Dazu zählen beispielsweise das Energy Harvesting im Zusammenhang mit dem Internet-of-Things (IoT) oder die Rückgewinnung von Energie, um die Energieeffizienz potenzieller digitaler Senderschaltungen in den zukünftigen 5G- und 6G-Netzen zu verbessern. Digitalisierte Sendeketten spielen auch eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung von CO<sub>2</sub> für die zukünftige mobile Kommunikation.

Bisher wurden W-Band-Gleichrichter ausschließlich in GaAs- oder CMOS-Technologien hergestellt. Erstmals haben wir einen Sub-THz-Gleichrichter in InP-Technologie vorgestellt, der unseren 0.85 μm Triple-Mesa-HBT-Prozess nutzt. Der hocheffiziente W-Band-Einzeldioden-Gleichrichter-MMIC besteht aus einer 2-Finger-p-n-Diode als Kernelement für die Gleichrichtung und einem Shunt-3-pF-Kondensator.

Der Sub-THz-Gleichrichter erreicht bei 108 GHz mit einem Lastwiderstand von 50 Ω und einer Eingangsleistung von -1.5 dBm einen maximalen Wirkungsgrad (PCE) von 69%. Diese Ergebnisse zeigen sein großes Potenzial für Anwendungen als Gleichrichter in drahtlosen W-Band-Energieübertragungssystemen der nächsten Generation.

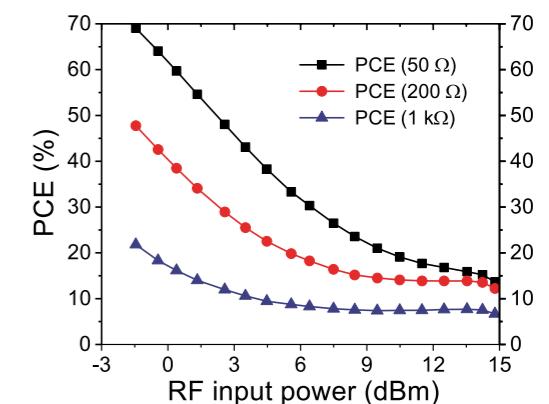


Fig. 3. Measured power conversion efficiency (PCE) vs. RF input power at the DUT for a  $R_{load}$  of 50 Ω, 200 Ω and 1 kΩ; input signal frequency: 108 GHz.

## Publication

A. Wentzel, H. Yacoub, T. K. Johansen, W. Heinrich, V. Krozer, "A Highly Efficient W-Band Rectifier MMIC in InP HBT Technology", Proc. of 17<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), <https://doi.org/10.23919/EuMIC54520.2022.9923551>

# Compact scalable MIMO radar modules for millimeter-wave imaging

Radar systems are becoming ubiquitous as imaging sensors, especially in scenarios where conventional visible or infrared illumination is not available. Millimeter-wave (mm-wave) imaging radar finds widespread use in the automotive sector, primarily for driver assistance and/or for autonomous vehicles. In space applications, radar plays a crucial role in detecting debris and its imaging, protecting satellites from potential collisions with large objects in space. The finite aperture in space necessitates original and efficient approaches for multiple transmitter (Tx) and receiver (Rx) channels in radar systems. This leads to MIMO radar architectures addressed in the MIMIRAE II project. The concept for the MIMIRAE radar system allows for simultaneous operation of all Tx and Rx channels, which makes this radar extremely fast and resource-efficient in scanning the field-of-view.

Compactness and scalability are fundamental in space applications where power consumption, aperture size, and data transfer speeds are restricted. Therefore, we have chosen a sparse array,

with 8 Tx x 8 Rx channels. In cooperation with the Goethe University Frankfurt am Main, we have developed a novel approach to operate all Tx simultaneously, in contrast to traditional time division multiplexing. The MIMO mm-wave radar is based on an FMCW radar concept with a DDS synthesized ramp generation. The DDS has been developed using IHP's SiGe BiCMOS technology. The radar operates around 85 – 95 GHz with 10 GHz instantaneous bandwidth and flexible pulse repetition frequencies, which can be reset on the fly. The simplified block diagram of the radar system is shown in Fig. 1.

At the heart of the MIMO radar is a highly compact mm-wave front-end in InP DHBT technology. It is comprised of an up-converter and a power amplifier for Tx and an LNA and down-converter for Rx. Both the Tx and Rx are realized on a single chip, respectively, as illustrated in Fig. 2. The mixers of the up- and down-converters are realized as image reject mixers. The Tx exhibits a simulated output power of 14 dBm. The output of the power amplifier is fed into the dedicated transition into the

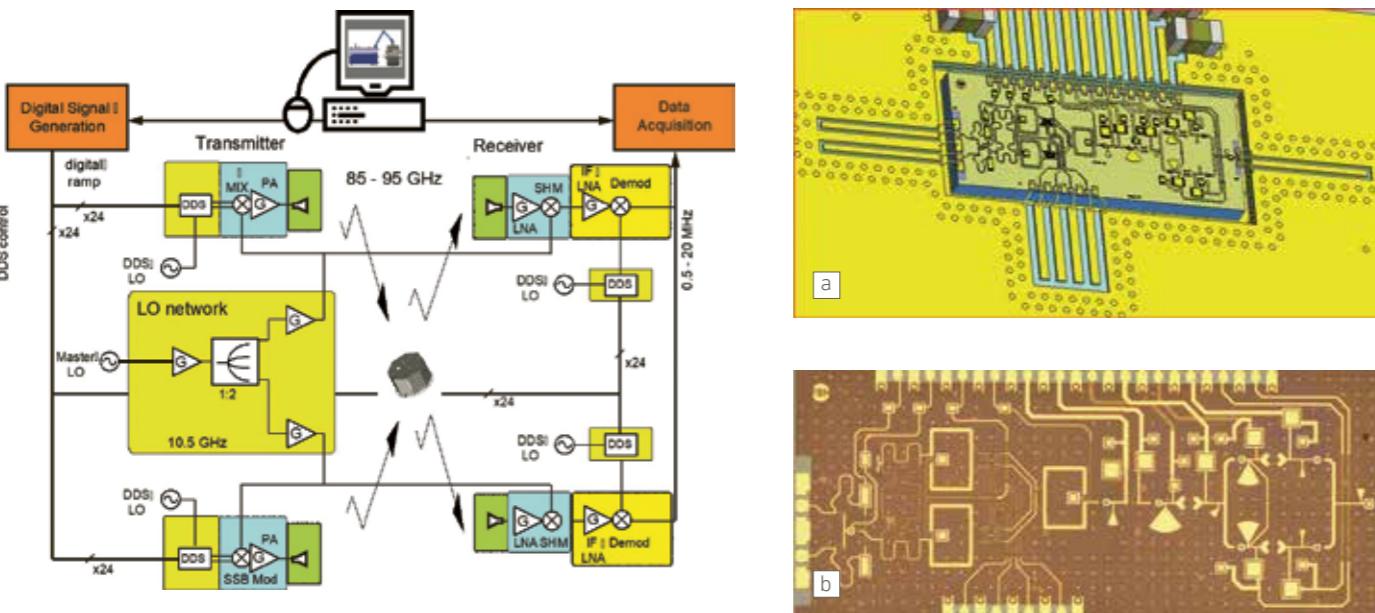


Fig. 1. Simplified block-diagram of the MIMIRAE MIMO radar system.

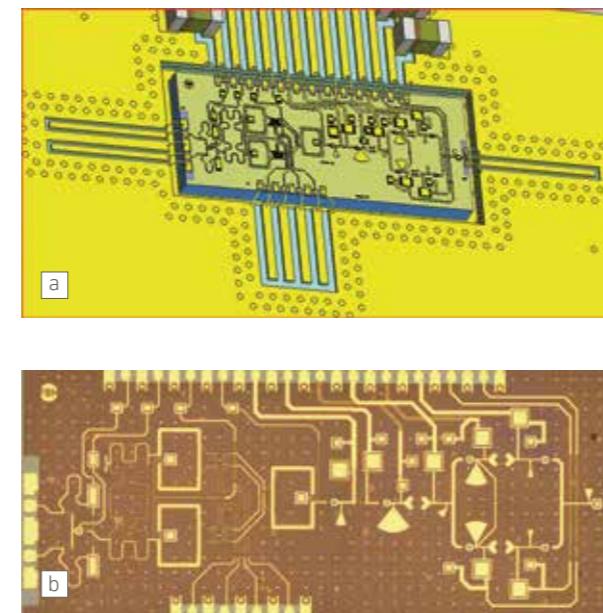


Fig. 2. (a) Mounting example of the integrated Tx with a single chip front-end InP up-converter and power amplifier.

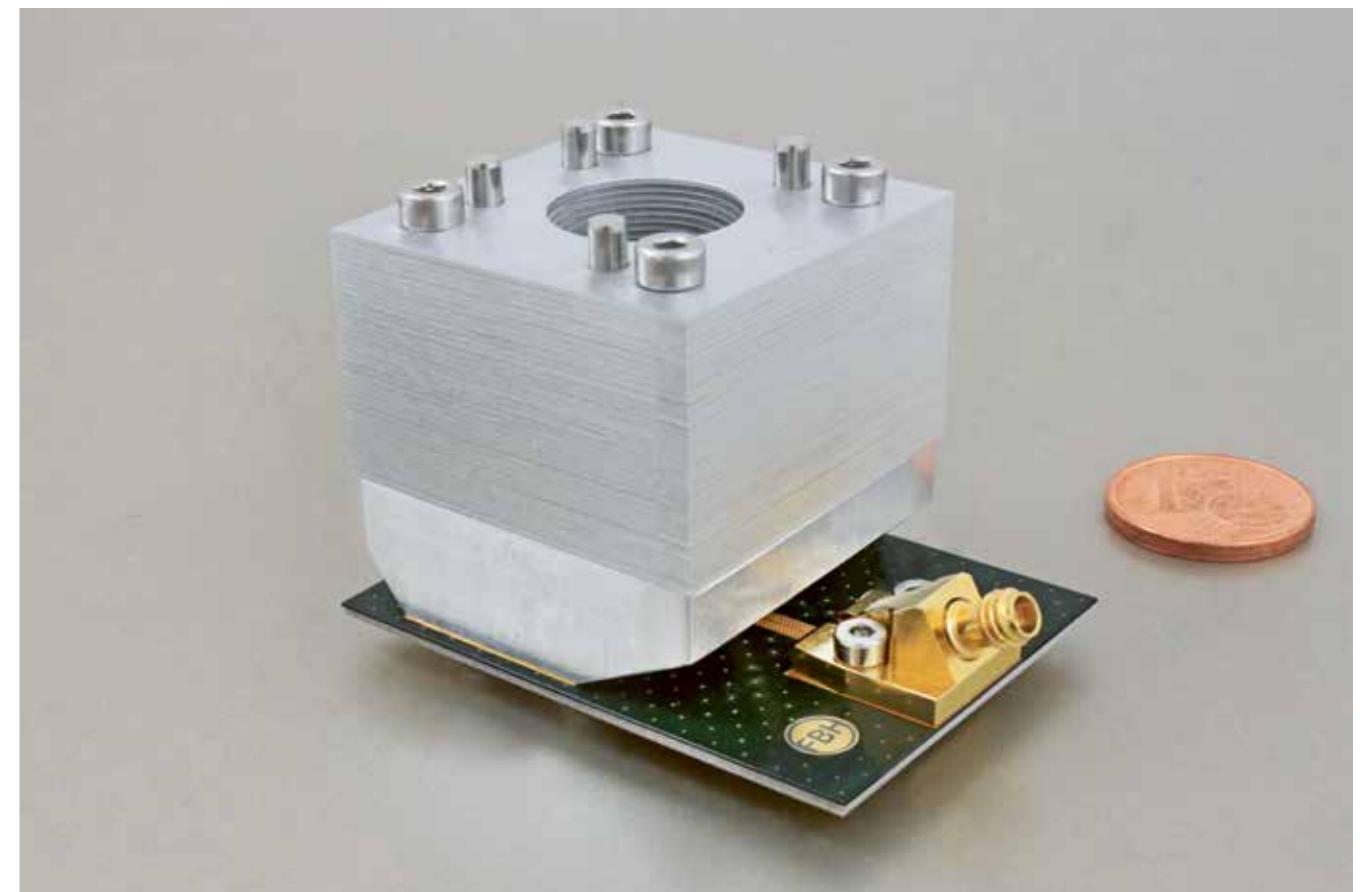


Fig. 3. Test structure for the novel corrugated horn antenna and waveguide to stripline transition.

waveguide and terminated in a horn antenna directly on the panel. A test jig of the transitions together with the horn antenna is depicted in Fig. 3. On the receive side a similar approach is chosen. This results in an ultra-compact design of each Tx and Rx front-end panel. All front-end units are mounted onto a common PCB containing the LO signal distribution and data acquisition.

Partial financial support from the German Aerospace Agency DLR under contract no. 50RA1910 is highly acknowledged.

## Publication

M. Hrobak, K. Thurn, J. Moll, M. Hossain, A. Shrestha, T. Al-Sawaf, D. Stoppel, N.G. Weimann, A. Rämer, W. Heinrich, J. Martinez, M. Vossiek, T.K. Johansen, V. Krozer, M. Resch, J. Bosse, M. Sterns, K. Loebbeke, S. Zorn, M. Eissa, M. Lisker, F. Herzel, R. Miesen, K. Vollmann, "A Modular MIMO Millimeter-Wave Imaging Radar System for Space Applications and Its Components", *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, vol. 42, no. 3, pp. 275-324 (2021).

Bildgebende Radarsysteme im Millimeterwellen-Bereich werden am häufigsten in der Automobilindustrie eingesetzt. Sie sind zudem für Weltraumanwendungen relevant, beispielsweise um an einen Satelliten sich nährende große Objekte abzubilden. Wegen der begrenzten Aperturgröße werden dafür MIMO-Radararchitekturen verwendet. In Kooperation mit der Goethe-Universität Frankfurt am Main entwickeln wir ein MIMO-FMCW-Radar mit 8 x 8 Kanälen für Sender und Empfänger bei 85 – 95 GHz. Dieses Radar erzeugt ein Rampensignal mithilfe eines eigens entwickelten DDS in SiGe-BiCMOS-Technologie und verfügt über kompakte integrierte Sender- und Empfangskomponenten. Dafür nutzen wir unsere InP-HBT-Technologie am FBH. Die MIMO Radararchitektur im Projekt erlaubt es, alle Sender und Empfänger gleichzeitig zu betreiben. Damit lassen sich die Bilder einer Szene schnell rekonstruieren.

Die integrierten Leistungsverstärker liefern eine Leistung von 14 dBm und werden mit einem Einseitenband-Mischer betrieben. Für die Empfängerseite verwenden wir eine entsprechende Architektur und haben zudem neuartige Rillenhorn-Antennen entwickelt mit einem integrierten Übergang zu einer Stripline.

# Targeting the next generation of electronics – AlN-based GaN-channel HEMTs on mono-crystalline AlN substrate

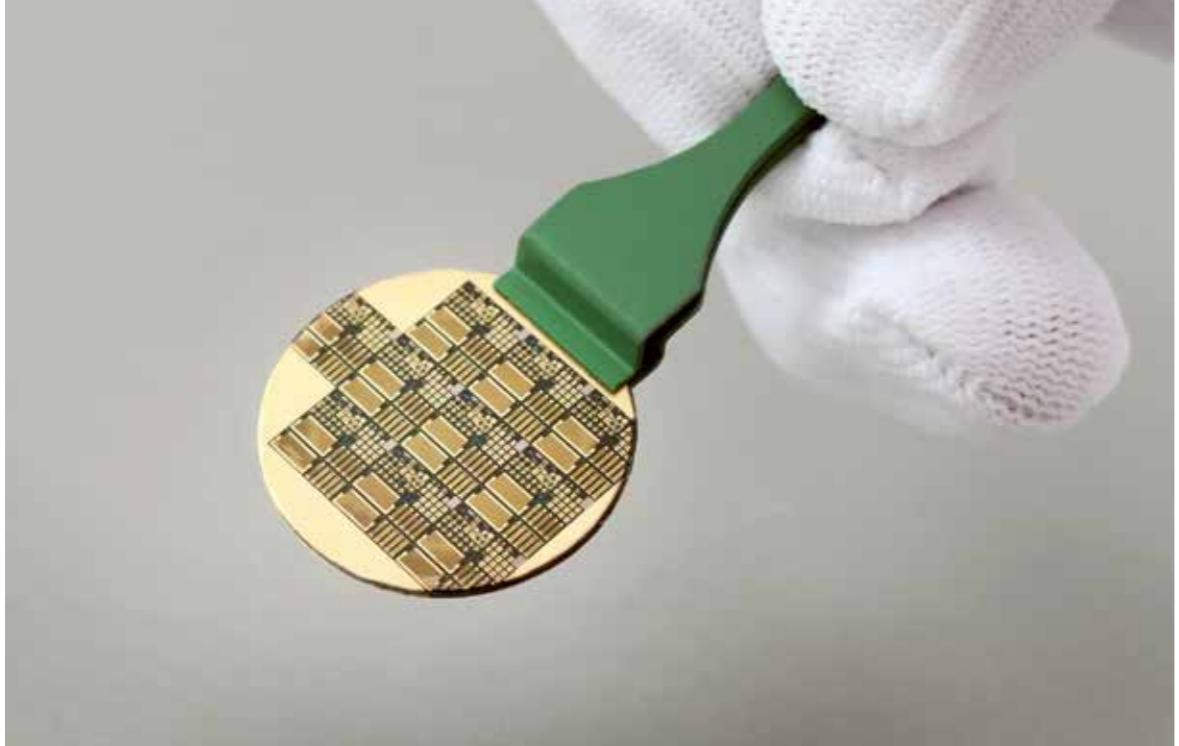


Fig. 1. Processed 1" semi-insulating mono-crystalline AlN substrate containing AlGaN/GaN/AlN-based HEMTs.

For many years, GaN and SiC wide-bandgap semiconductors have been the cutting-edge materials behind technological advancements in high-voltage transistors used in power-electronic systems. GaN-based high-electron-mobility transistors (HEMTs) have achieved successful commercialization across a broad spectrum of applications due to their capability to operate at very high switching frequencies and with superior energy efficiency. However, when considering nowadays' targets for power-electronic systems aimed at powering electrified, carbon-neutral societies, ultra-wide bandgap (UWBG) materials such as aluminum nitride (AlN) and gallium oxide ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) emerge as compelling candidates for the next generation of electronics. AlN power-electronic devices could benefit from the material's high bandgap  $\sim 6.2$  eV, high thermal conductivity  $\sim 340$  W/(m·K), and an estimated high material critical electric field strength exceeding 10 MV/cm.

At FBH, we focus on the development of AlN-based electronic devices and explore the advantages of AlGaN/GaN/AlN HEMT

devices. These are MOCVD-grown on native mono-crystalline 1" AlN substrates (Fig.1) rather than relying on hetero-epitaxy on foreign substrates [1]. Hence, the AlN-buffer layer needs no compensation doping due the high back-barrier with respect to the GaN channel. Related dispersion effects as known from conventional AlGaN/GaN HFETs are expected to be reduced or even absent, and ensure a higher power density in high-voltage switching. The AlN buffer layer growth by homo-epitaxy allows to reduce device defect densities and lower the thermal impedance, leading to better reliability in particular under high-voltage conditions. Details on AlN-based transistor epitaxy can be found on p. 124.

The DC characteristics of such AlN-on-AlN transistors (Fig. 2) are very similar to conventional GaN HEMTs. However, they show particularly low hysteresis effects, also when compared to transistors with a similar epi-stack grown on SiC substrates [2]. An average breakdown voltage ( $V_{\text{Br}}$ ) scaling of  $125\text{ V}/\mu\text{m}$  was achieved for  $250\text{ }\mu\text{m}$  devices with gate-drain separation

( $d_{\text{GD}}$ ) up to  $18\text{ }\mu\text{m}$  (Fig.3). It is probably related to the homo-epitaxy device nature that this scaling remains valid even above  $1000\text{ V}$ . A power density of  $V_{\text{Br}}^2/(R_{\text{ON}} \cdot A) = 1.34\text{ GW/cm}^2$  was extracted from a device with  $d_{\text{GD}} = 18\text{ }\mu\text{m}$  and  $V_{\text{Br}} = 2227\text{ V}$ . This is a record for high-voltage GaN-channel transistors grown on AlN substrates, to the best of our knowledge.

Power-electronics benchmarking of  $V_{\text{Br}}$  vs.  $R_{\text{ON}} \cdot A$  for the currently studied GaN-channel AlN-on-AlN devices, our previously reported results on GaN-channel AlN-on-SiC HFET devices [2], as well as recently reported AlGaN-channel AlN-on-AlN devices are depicted in Fig. 4. First-time high-voltage switching transients were performed on  $9.2\text{ mm}$  gate-width AlN-on-AlN devices at  $464\text{ V}$  and  $0.6\text{ A}$  [1]. They show similar dynamic behavior as their counter AlN-on-SiC devices [2]. The AlN-buffer/GaN-channel interface was found to be the consistent reason for electron trapping and related dynamic  $R_{\text{ON}}$  increase for voltages over  $200\text{ V}$ , which is directly influenced by the thickness of the GaN-channel.

Support provided by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in the frame of the ForMikro project LeitBAN and funding in the frame of Research Fab Microelectronics Germany (FMD), reference 16FMD02, is gratefully acknowledged.

## Publications

[1] M. Wolf, F. Brunner, C. Last, H. Halhoul, D. Rentner, E. Bahat Treidel, J. Würfl, O. Hilt "1.17 GW/cm<sup>2</sup> AlN-based GaN-channel HEMTs on mono-crystalline AlN substrate", IEEE Electron Device Letters, <https://doi.org/10.1109/LED.2024.3391397>

[2] O. Hilt, F. Brunner, M. Wolf, E. Bahat Treidel, J. Würfl, A. Thies, A. Mogilatenko, "10 A/950 V switching of GaN-channel HFETs with non-doped AlN buffer", 35<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices (ISPSD), Hong Kong, <https://doi.org/10.1109/ISPSD57135.2023.10147681>

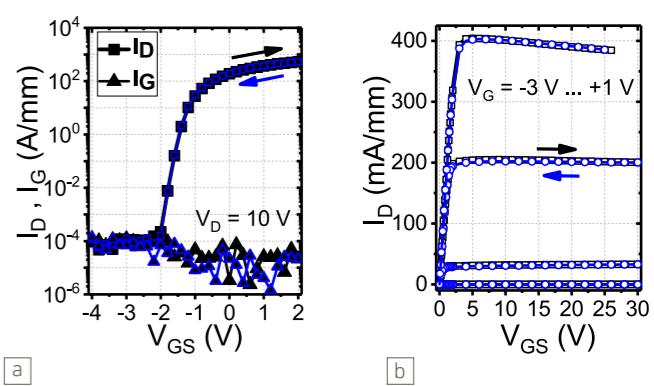


Fig. 2. Forward (red) and backward (blue) DC (a) transfer curves at  $V_{\text{GS}} = 10\text{ V}$  and (b) output IV scans of AlN-on-AlN transistors with gate-drain separation  $d_{\text{GD}} = 2\text{ }\mu\text{m}$  at  $V_{\text{DS}} = 10\text{ V}$ .

Angesichts seiner ultrahohen Bandlücke, der ausgeprägten Wärmeleitfähigkeit und der hohen Durchschlagsfestigkeit zeigt sich Aluminiumnitrid (AlN) als vielversprechendes Halbleitermaterial für Hochspannungs-Schalttransistoren. Diese Bauelemente werden in effizienten Leistungskonvertern mit besonders hoher Leistungsdichte benötigt.

Wir haben nun unsere Technologie der AlN-basierten GaN-Kanal-Transistoren von SiC-Fremdsubstraten auf neue native 1" AlN-Substrate übertragen. Dabei konnten wir die Defekt-dichte in der AlN-Pufferschicht durch das Homoepitaxie-Wachstum deutlich verringern. Die neuen AlN-auf-AlN Transistoren erreichen höhere Durchbruchspannungen. Für einen AlN-auf-AlN Transistor bei  $18\text{ }\mu\text{m}$  Gate-Drain-Abstand haben wir so eine Durchbruchspannung von  $2227\text{ V}$  erreicht. Die Leistungsdichte dieser Hochspannungs-Leistungsschalter liegt bei  $1,34\text{ GW/cm}^2$  – ein Rekordwert für AlN-basierte Transistoren.

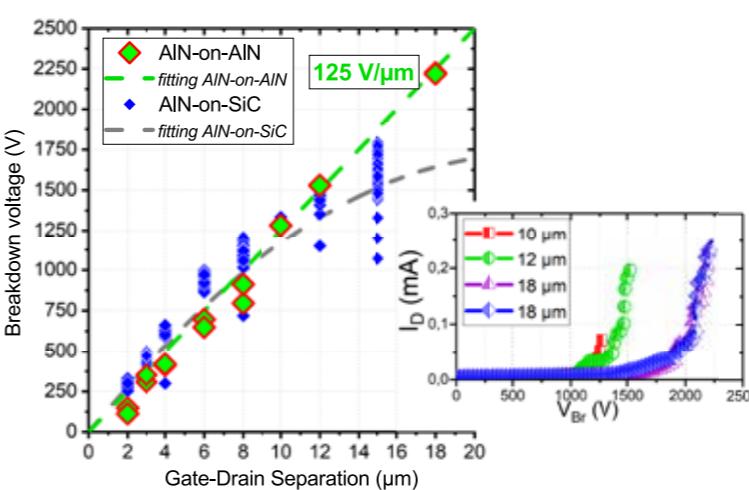


Fig. 3. Wafer-level distribution of  $V_{\text{Br}}$  vs.  $d_{\text{GD}}$  of AlN-on-AlN devices in comparison to AlN-on-SiC devices [2] with an insert of the off-state breakdown curves at  $V_{\text{GS}} = -5\text{ V}$  for the devices with  $d_{\text{GD}} \geq 10\text{ }\mu\text{m}$ .

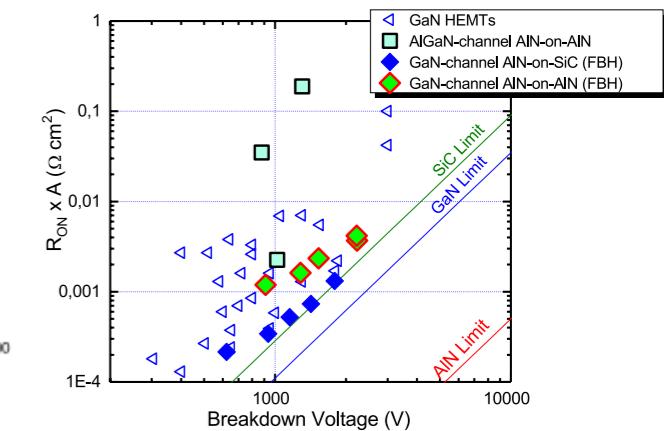


Fig. 4. Breakdown voltage vs. specific on-state resistance of AlN-based devices fabricated at FBH, as compared with other state-of-the power devices.

# Vertical high-voltage GaN-based *pn*-diodes on foreign and native substrates – targeting next-generation power electronics

Vertical GaN-based power switching devices are desired for their high blocking strength above 1.2 kV, while maintaining specific onstate resistances lower than  $1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ . Both properties are key for power electronic converters with high power density and efficiency. However, achieving both features simultaneously is contradictory but can be optimized by careful design. Thus, growth of a GaN epitaxial drift region thicker than 10  $\mu\text{m}$  with well controlled low carrier concentration as low as  $10^{16}\text{ cm}^{-3}$  is required. Homoepitaxy on a free-standing GaN wafer allows growth of very thick layers due to an identical crystal constant and thermal expansion coefficient. Yet, free-standing GaN substrates, manufactured by Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) or ammonothermal (AmGaN) growth methods, feature a small diameter, have limited availability, and are very expensive. Alternatively, thick epitaxial GaN layers may be grown on commonly used sapphire substrates, which provide a large area and are attractively priced.

Growth of thick GaN epitaxial layers on sapphire substrates is not free from challenges. Strong lattice mismatch and large thermal expansion coefficient between the substrate and the GaN layer result in large wafer deformation, layer cracking,

and propagation of structural defects to the epitaxial structures. Such growth anomalies deteriorate wafer processability in semiconductor processlines and the devices' desired electrical properties. The epitaxial GaN layers quality grown on the different substrates can be quantified with their threading dislocation density (TDD). Typical threading dislocation density values are  $\sim 10^4\text{ cm}^2$ ,  $\sim 10^{10}\text{ cm}^2$ , and  $\sim 5 \times 10^8\text{ cm}^{-2}$  for Am-GaN, HVPE, and sapphire substrates, respectively. At FBH, we have developed thick epitaxial layers that serve as drift region in vertical GaN-based power switching devices on different substrate types. The epitaxial structure comprises a 10  $\mu\text{m}$  thick drift region and  $\sim 1-1.5 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$  n-type doping concentration along with a specific resistivity of  $11.5\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  grown by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) on each of the substrate types. Quasivertical *pn*-diodes were manufactured as a sensitive electronic monitoring device to assess the drift zone properties. Fig. 1 depicts a GaN-based vertical diode scanning electron microscope micrograph and its schematic cross section.

Characterizing these devices electrically provides validated information on the drift region conductivity, its exact carrier concentration, and its breakdown voltage. Namely, we investigated

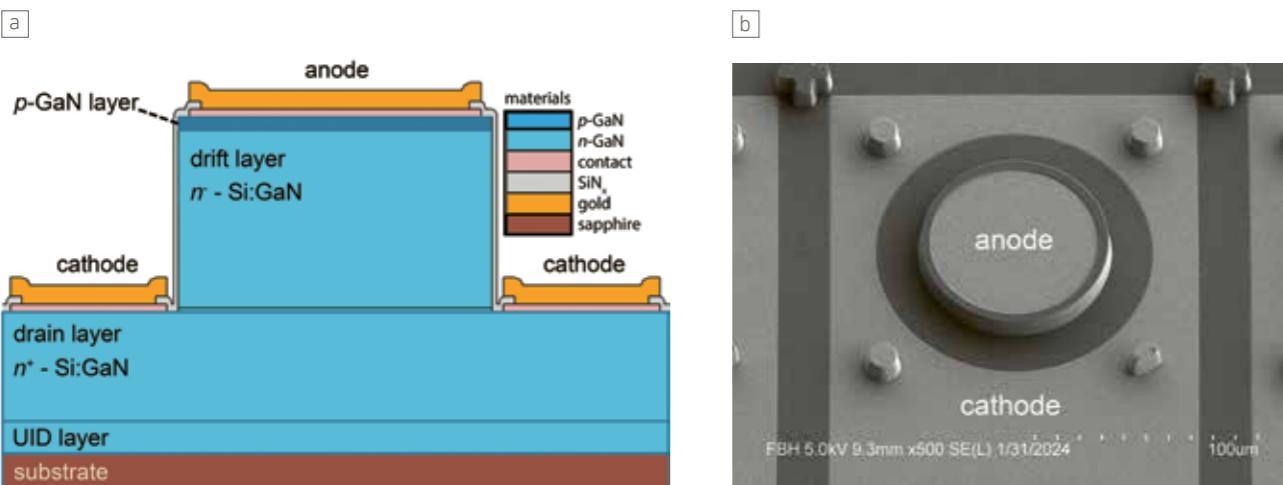


Fig. 1. (a) Schematic of the layer structure and layout of the quasi-vertical *pn*-diode and (b) SEM picture of the processed circular device.

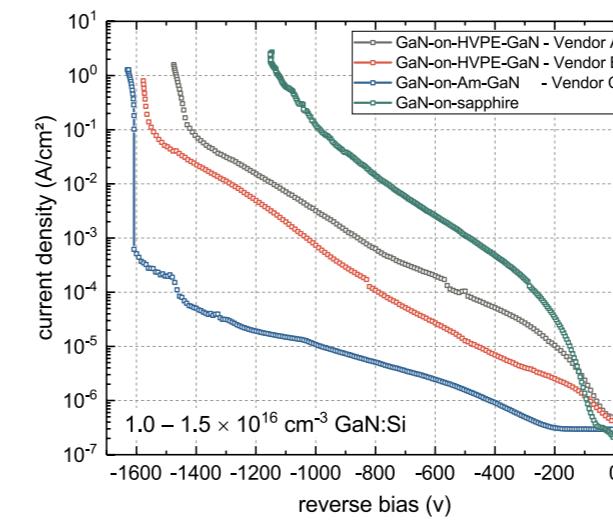


Fig. 1. Vertical GaN-based *pn*-diodes current density vs. reverse bias characteristic for devices processed on different types of substrate.

the relation between the threading dislocation density and the *pn*-diode reverse blocking characteristics. Fig. 2 summarizes the reverse blocking characteristic of diodes manufactured on the different substrates. Diodes on Am-GaN substrates have the lowest reverse current and reach breakdown at  $\sim 1600\text{V}$ . The IV characteristics at breakdown indicate avalanching. The reverse leakage current of diodes manufactured on HVPE substrates is two orders of magnitude higher and breakdown is reached at  $\sim 1450\text{V}$  to  $1550\text{V}$ , still with indications for avalanching. On the other hand, the sapphirebased diodes with the same drift zone doping level and thickness is limited to  $\sim 1100\text{V}$  only due to an even higher leakage current level. In that case our current limit defining breakdown is reached prior to the onset of impact ionization. By comparing different types of substrates, we could deduct a direct correlation between threading dislocation density in the GaN drift layer with the reverse bias current and breakdown strength in *pn*-diodes.

This work was partly supported by ECSEL JU through the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program and Germany, France, Belgium, Austria, Sweden, Spain, and Italy, under Grant 101007229. Further funding was provided by the Federal Ministry of Economics and Climate Protection (BMWK, IIB5) under reference 03EN4033E, joint project 01247760/1 – HoverGaN.

GaN-basierte, vertikale Leistungsbauelemente sind dank ihrer hohen Sperrfestigkeit von über 1,2 kV hochattraktiv für die Leistungselektronik der nächsten Generation. Zugleich bieten sie einen sehr niedrigen spezifischen Durchlasswiderstand von weniger als  $1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ . Um beide Eigenschaften gleichzeitig zu erreichen, optimieren wir Design und Wachstum von epitaktisch gewachsenen GaN-Driftzonen sehr sorgfältig. Die Versetzungsichte der mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie gewachsenen GaN-Schichten hängt dabei stark vom Substrat ab. Sie schwankt zwischen  $\sim 10^4\text{ cm}^2$  für Am-GaN-Substrate und  $\sim 5 \times 10^8\text{ cm}^{-2}$  für Saphir-Substrate.

Wir haben vertikale *pn*-Dioden mit einer 10  $\mu\text{m}$  dicken  $\sim 1-1.5 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$  n-Typ Driftzone auf unterschiedlichen Substraten hergestellt. Dioden auf Am-GaN-Substraten zeigen den niedrigsten Sperrleckstrom und erreichen den Durchbruch bei  $\sim 1600\text{V}$ . Auf HVPE-GaN-Substraten hergestellte Bauelemente bieten einen um zwei Größenordnungen höheren Sperrleckstrom und erreichen den Durchbruch bei  $\sim 1450$  bis  $1550\text{V}$ . Hingegen ist das Saphir-basierte Bauelement mit identischem Dotierungsniveau und gleicher Driftzonendicke aufgrund eines noch höheren Sperrleckstroms auf  $\sim 1100\text{V}$  begrenzt. Durch diesen Vergleich konnten wir eine direkte Korrelation zwischen der Dichte der Fadenversetzungen in der GaN-Driftschicht und dem Umkehrstrom herstellen.

## Publications

- [1] E. Brusaterra, E. Bahat Treidel, F. Brunner, M. Wolf, A. Thies, J. Würfl, O. Hilt, "Optimization of vertical GaN drift region layers for avalanche and punch-through *pn*-diodes", IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 3, pp. 388-391, <https://doi.org/10.1109/LED.2023.3234101>
- [2] E. Bahat Treidel, E. Brusaterra, M. Wolf, F. Brunner, O. Hilt, J. Würfl, "Drift region epitaxy development and characterization for high blocking strength and low specific resistance in vertical GaN based devices", Proc. CS MANTECH, Orlando FL, USA (2023).
- [3] E. Brusaterra, E. Bahat Treidel, F. Brunner, O. Hilt, M. Wolf, O. Hilt, "Comparison between sapphire and GaN substrates for 1.2kV rated vertical GaN *pn*-diodes", MRS spring meeting, Seattle Wa USA. (2024).
- [4] E. Brusaterra, E. Bahat Treidel, F. Brunner, A. Küberg, M. Wolf, O. Hilt, "Wafer Bow Tuning with Stealth Laser Patterning for Vertical High Voltage Devices with Thick GaN Epitaxy on Sapphire Substrates", CS MANTECH, Tucson Az. USA (2024).

# Improving RF performance parameters – implanted ohmic contacts for GaN transistors

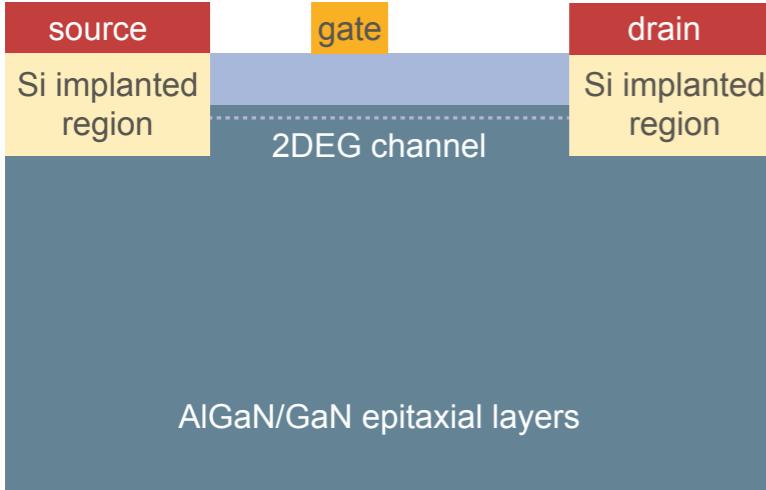


Fig. 1. Schematic transistor cross section in which Si was implanted beneath the source and drain ohmic contacts.

GaN-based MMICs are potentially interesting for 5G and future 6G telecommunication systems. Achieving high RF-performance parameters, such as output power density, switching frequency limit, minimum noise figure and linearity, is crucial for these applications. The contact resistance ( $R_c$ ) of the transistors emerges as a pivotal limiting factor in this regard. Utilizing our planar Au-based alloyed ohmic contact technology at FBH,  $R_c$  values typically range 0.3 to 0.6  $\Omega\cdot\text{mm}$  with an in-wafer variation of  $\pm 0.12 \Omega\cdot\text{mm}$ . To lower  $R_c$  and enhance wafer uniformity, we have now developed a Si-implanted method. In this approach, a high Si dose is implanted beneath the ohmic contacts in the source/drain region (refer to Fig. 1) and subsequently activated at around 1150 °C using a MOCVD system.

Fig. 2 illustrates contact resistances and DC characteristics of test transistors with standard non-implanted and Si-implanted ohmic contacts. It reveals that the contact resistance is significantly reduced for the implanted contacts. The mean  $R_c$  has decreased approximately threefold from 0.42  $\Omega\cdot\text{mm}$  (Fig. 2a) to 0.14  $\Omega\cdot\text{mm}$  (Fig. 2b). Also, the on-wafer standard deviation is reduced from  $\pm 0.12 \Omega\cdot\text{mm}$  down to  $\pm 0.02 \Omega\cdot\text{mm}$ . For the test transistors, the reduced  $R_c$  is reflected in a higher DC current

density (Fig. 2c) and in an increased transconductance ( $gm$ ), see Fig. 2d. Transistors employing the implanted ohmic approach exhibit a 0.1 S/mm higher maximum transconductance, suggesting improvements in both small signal and large signal performance of RF HEMTs. Load-pull measurements conducted at 20 GHz (Fig. 3a) demonstrate a similar improvement trend in power added efficiency (PAE) up to 5 %, along with a 0.4 W/mm increase in maximum output power density at 28 V (Fig. 3b). Additionally, reduction in the noise figure ( $NF_{min}$ ) via the lowered  $R_c$  is expected. Consequently, these advancements support FBH's baseline technology to a more compelling candidate for upcoming telecommunication systems.

These activities were carried out within the European Space Agency project Kassiopeia "European Ka-band high-power solid-state technology for active antennas" under contract ESA ITT A0/1-10215/20/NL/CLP.

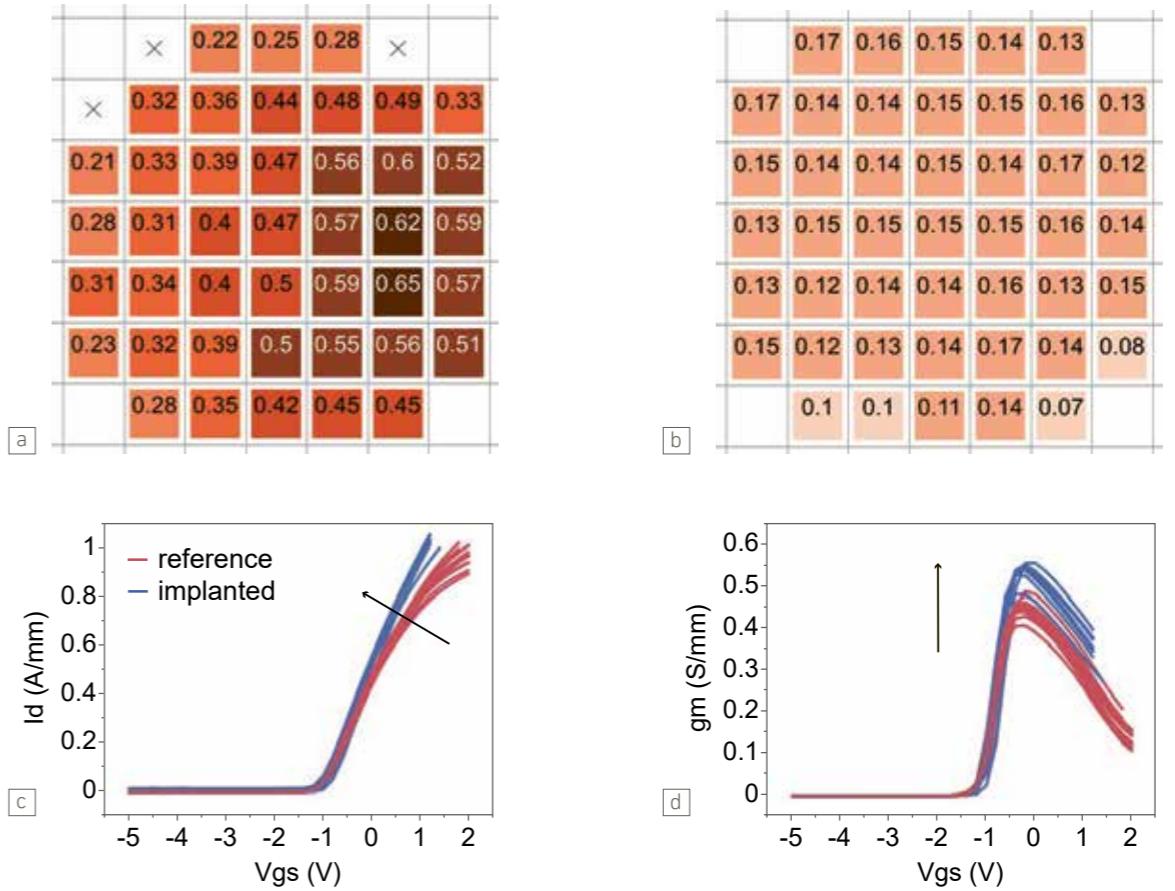


Fig. 2. Contact resistance 4"-wafer map in  $\Omega\cdot\text{mm}$  as extracted from TLM structures for (a) standard non-implanted, (b) Si-implanted ohmic contacts, (c) transfer characteristics ( $V_{DS} = 10 \text{ V}$ ), and (d) extracted transconductance profiles for 0.1 mm wide test transistors with non-implanted (red) and implanted (blue) ohmic contacts.

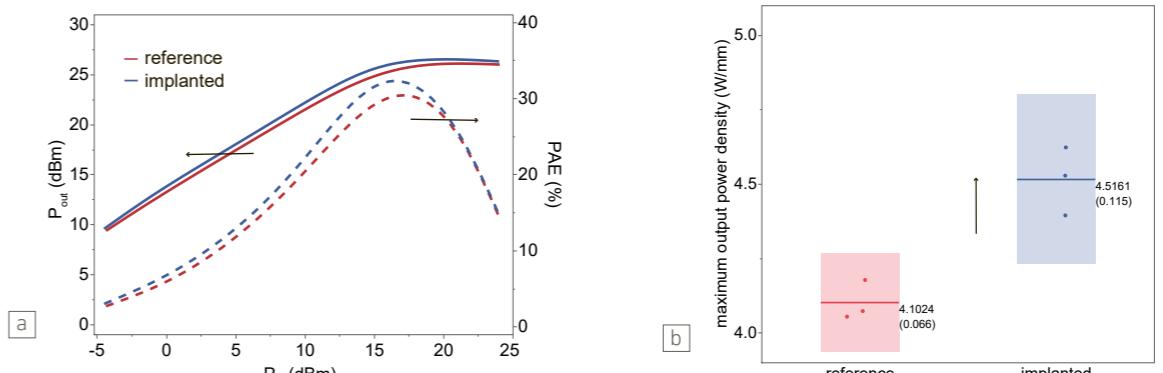


Fig. 3. Load pull measurements at 20 GHz and 28 V drain bias on  $2 \times 50 \mu\text{m}$  devices with non-implanted (red) and implanted (blue) ohmic contacts comparing (a) output power ( $P_{out}$ ) and PAE (Eff) vs. input power ( $P_{in}$ ) and (b) extracted maximum output power density.

GaN-MMICs mit hoher HF-Leistung werden für künftige Telekommunikationssysteme benötigt. Ihre Ausgangsleistung ist jedoch oft durch die Kontaktwiderstände der Transistoren begrenzt. Um die Widerstandswerte zu verkleinern, haben wir eine Technologie mit lokal dotierten Kontakten entwickelt. Dabei wird Silizium in die Halbleitergebiete unterhalb der Kontaktmetallisierung implantiert und bei hohen Temperaturen in einem MOCVD-Reaktor aktiviert. In einem Vergleichsexperiment konnten wir den Kontaktwiderstand damit

von  $0.42 \Omega\cdot\text{mm}$  auf  $0.14 \Omega\cdot\text{mm}$  reduzieren. Zusätzlich verringerte sich die Streuung der Widerstandswerte auf einem 4" Wafer von  $\pm 0.12 \Omega\cdot\text{mm}$  auf  $\pm 0.02 \Omega\cdot\text{mm}$ . Der verringerte Kontaktwiderstand führte in Testtransistoren zu einer höheren Stromdichte und einer größeren maximalen Transistorsteilheit. Loadpull-Messungen bei 20 GHz zeigten eine um 0.4 W/mm höhere Ausgangsleistung und die Effizienz erhöhte sich um 5 %. Die neuen ohmschen Kontakte ermöglichen daher leistungsfähigere Hochfrequenztransistoren, die sich für 5G- und 6G-Anwendungen eignen.

# Enhancing high-performance transistors – Ge-ion implantation for ohmic contact improvement in $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

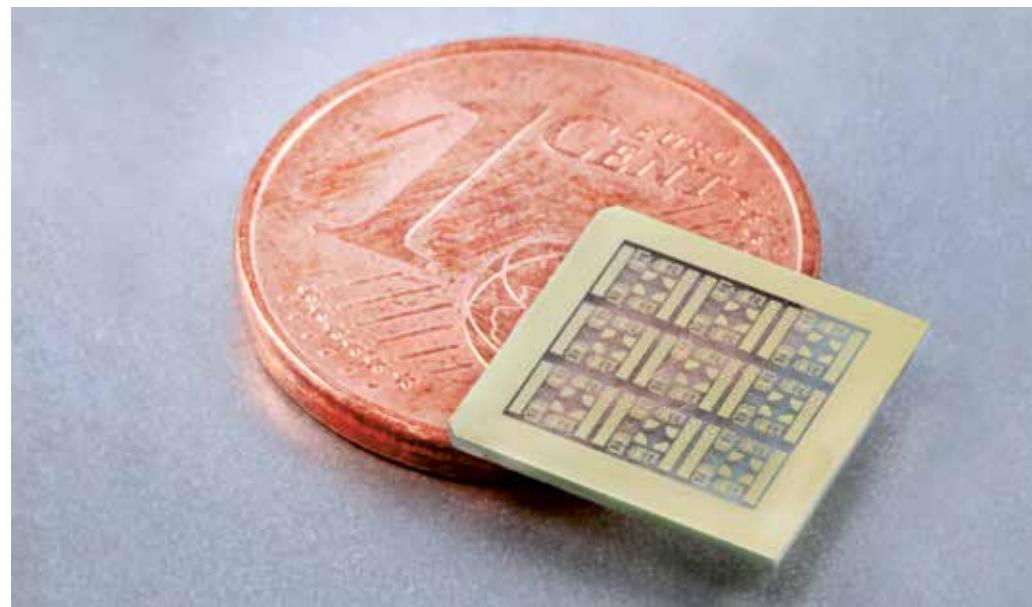


Fig. 1. Simulated depth profiles of the distributed Ge-ions created from the multiple energy ion implantation into an epitaxial  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  wafer showing the individual contributions of each energy and the resulting total profile.

In recent years, beta gallium oxide ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ) with its ultra-wide bandgap of 4.8 eV has emerged as a promising semiconducting material for next-generation power electronic devices. The anticipated high breakdown strength of 8 MV/cm and the resultant elevated Baliga's figure of merit indicate the material's potential towards more compact and also more efficient power converters when compared to well-established SiC and GaN technologies. Notably, lateral and vertical  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  transistor devices have exhibited remarkable performances. These transistors currently manifest an average breakdown strength of up to 5.5 MV/cm and exhibit record-breaking breakdown voltages reaching 10 kV. Furthermore, the power figure of merit demonstrates a continual ascent, nearly surpassing a value of 1 GW/cm<sup>2</sup>, attributed to ongoing enhancements in material quality and device optimizations. One major key requirement for high-performance transistors based on wide-bandgap semiconductors such as  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  is the formation of low ohmic contact resistances in order to reduce conduction losses inside the devices. This becomes even more important for RF devices, where the channel resistance is much lower compared to high-voltage devices.

In collaboration with the Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), we have started to study the temperature-dependent activation efficiency of implanted Ge in (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Our joint activities aim at determining the optimum annealing conditions for

improved n-type doped ohmic contacts. The experiments were carried out on epitaxial (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  wafers consisting of Mg-doped semi-insulating substrates prepared from Czochralski growth. A 200 nm thick Si-doped  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  layer was homoepitaxially grown on them by metal-organic chemical vapor deposition. The layers featured a charge carrier concentration and mobility of  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  and  $123 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , respectively. The samples were subjected to a multiple energy Ge<sup>+</sup> ion implantation process to obtain a 100 nm box-like profile with a total ion concentration of  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  as shown in Fig. 1. Afterwards, Ge<sup>+</sup> activation was carried out using a pulsed rapid thermal annealing system. For all experiments, the annealing process involved a preheating step at a base temperature of 900 °C over a period of 10 minutes. This step was followed by pulses up to 1000, 1100, or 1200 °C with a total number of 10 or 40 pulses. Finally, Ti/Au contacts were deposited, allowing to characterize the implanted samples electrically.

Transfer length method (TLM) measurements revealed that the specific contact resistivity significantly drops down to  $4.8 \times 10^{-7} \Omega\text{cm}^2$  after applying 40 pulses up to 1100 °C, as shown in Fig. 2. This is a reduction of more than one order of magnitude compared to non-implanted reference samples. Furthermore, Hall effect measurements verified an activation efficiency of up to 19 %, which might be even underestimated due to the inhomogeneous Ge profile presented in Fig. 1. Finally, secondary ion mass spectrometry

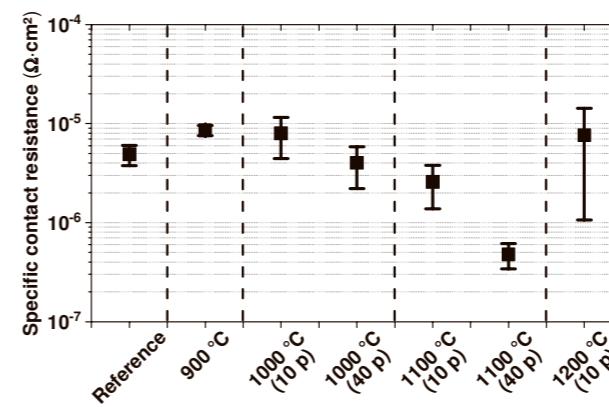


Fig. 2. Overview of the measured specific contact resistance as a function of the annealing conditions as extracted from TLM measurements.

on Ge<sup>+</sup>-implanted (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  samples was carried out. This was done both without and with annealing at 1100 °C using 40 pulses to analyze the influence of the annealing process on the diffusion of the implanted Ge<sup>+</sup> ions, as shown in Fig. 3. The measurements verify no vertical diffusion of Ge into the bulk after annealing, which proves the stability of this implantation process.

In conclusion, our results demonstrate the high potential of applying high-temperature annealing processes above 1000 °C after Ge implantation. This is effective for reaching low ohmic contact resistances to (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , which might be also suitable for other implanted shallow donors.

This work was performed in the framework of GraFOx, a Leibniz-ScienceCampus partially funded by the Leibniz Association. Further funding was provided by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the research project GoNext, funding no. 16ES1084K.

## Publication

K. Tetzner, A. Thies, P. Seydov, T.-S. Chou, J. Rehm, I. Ostermayr, Z. Galazka, A. Fiedler, A. Popp, J. Würfl, O. Hilt, "Ge-ion implantation and activation in (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  for ohmic contact improvement using pulsed rapid thermal annealing", *J. Vac. Sci. Technol. A* 41, 43102 (2023).

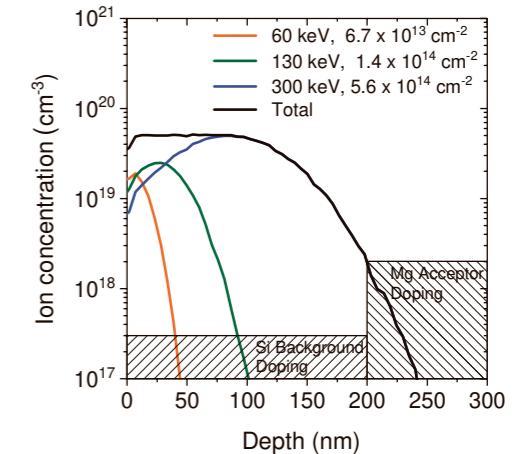


Fig. 1. Simulated depth profiles of the distributed Ge-ions created from the multiple energy ion implantation into an epitaxial  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  wafer showing the individual contributions of each energy and the resulting total profile.

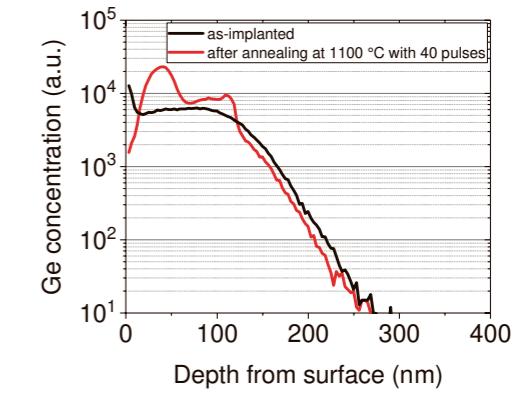


Fig. 3. Ge depth profiles in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  before and after thermal treatment at 900 °C for 10 minutes with additional pulsed RTA treatment at 1100 °C using 40 pulses.

Galliumoxid ist ein vielversprechendes Halbleitermaterial für leistungselektronische Systeme der nächsten Generation leistungselektronischer Systeme. Seine exzellenten Materialeigenschaften, wie der hohe Bandabstand von etwa 4,8 eV und die zu erwartende hohe Durchschlagsfestigkeit von 8 MV/cm machen es besonders attraktiv. Weltweit wurden bereits vielversprechende Ergebnisse bei der Herstellung hochperformanter Leistungsschalttransistoren auf der Basis von  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  erzielt. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass sich ohmsche Kontakte mit niedrigen Kontaktwiderständen formieren, die die Verluste innerhalb der Bauelemente minimieren.

Um diese ohmschen Kontakte zu verbessern, haben wir in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung die Implantation von Germanium in (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  untersucht. Dabei zeigte sich, dass mittels eines gepulsten thermischen Ausheilverfahrens bei 1100 °C der Kontaktwiderstand um etwa eine Größenordnung verringert werden kann. Zudem konnten wir nachweisen, dass die implantierten Germanium-Ionen eine hohe Diffusionsstabilität aufweisen. Dies verdeutlicht das hohe Potential dieses Prozesses. Dank der gewonnenen Erkenntnisse können wir nun die Leistungseigenschaften von  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -Leistungsschalttransistoren weiter verbessern und damit die Effizienzen von Schaltkonvertern steigern.

# Sustainable plastics processing – using microwaves for efficient polymer melting

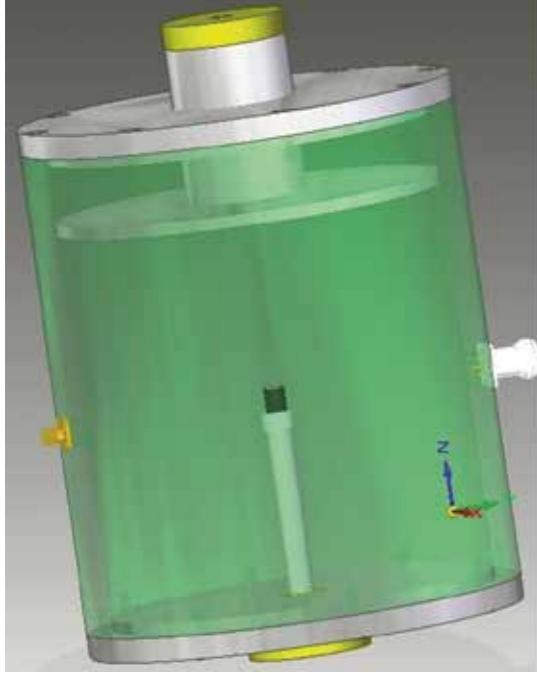
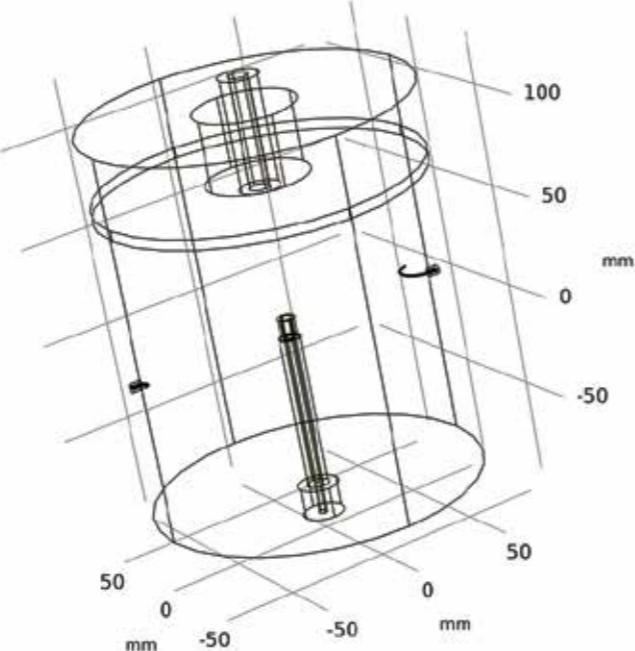


Fig. 1. Resonant structure for microwave characterizations of plastics.



The demand for efficient energy use in industrial applications and the political pressure to transition away from fossil fuels is higher today than ever before. While plastic pollution remains a problem, these materials are still an integral part of our daily lives. However, there is a clear shift towards recycling and environmentally friendly alternatives. Key to this change is the need for energy-efficient processing methods. With this in mind, the pursuit of sustainable plastics processing is a technological necessity.

Currently, the conventional approach to plastic melting and shaping is performed using hot air or steam. This method relies on thermal energy that heats not only the processing sample but, unavoidably, also the chamber walls and jaws. Therefore, substantial electrical power in the kilowatt range is required. Moreover, the low thermal conductivity of plastics restricts the maximum heating temperature to prevent burning, thus prolonging the processing time significantly.

Plastics exhibit a notable capability to absorb electromagnetic energy, resulting in a homogeneous elevation of temperature throughout the whole volume. This intrinsic property holds significant promise for technological advancement. Our research team, alongside others in the field, has initiated investigations using megahertz frequencies (13.56 MHz) for plastic processing. There are relatively affordable and efficient generators available in this range, while the construction of the shaping tool does not require special electromagnetic issues such as screening. However, the absorption of low frequency electromagnetic waves is weak and strongly temperature dependent. Consequently, the heating process of plastics is nonlinear and poses challenges in terms of reproducibility.

In general, microwaves (2.45 GHz) are better absorbed by plastics. Polymers electrically consist of dipoles that have a statistically decay time for their reorientation. This decay time is comparable to the microwave period, which is why increased absorption is to be expected in this frequency range. Moreover, due to the short wavelength of the microwaves (approx. 12 cm at 2.45 GHz), one can build special cavity resonators that concen-

trate the energy only on the strain or tensile parts of the plastic to be processed.

Since literature is very poor on electromagnetic data (permittivity, tangent of delta as a function of temperature) for plastics in the microwave range, we have developed a characterization method for this purpose and measured various industrially used plastics. Fig. 1 shows our concept, a cylindrical resonator that holds a tube-shaped sample in the center. It is placed on a Teflon holder with an optical thermometer attached, which does not interact with the microwaves. There are two microwave connectors: A high-power generator is coupled at one port to heat the sample contactlessly. A vector network analyzer is connected to the second port, allowing to characterize the resonance (frequency and Q-factor). Applying dedicated simulations and calibrations one can link the resonance parameter with the plastic physical properties.

In Fig. 2, direct resonance measurements for two calibrations (air,  $\epsilon=1$  and  $\tan(\delta)=0$  and Teflon,  $\epsilon=2$  and  $\tan(\delta)<10^{-4}$ , negligible) and for PPA (polyphthalamide) are presented as an example. From this data, one can extract the temperature dependence of the resonance frequency and the Q-factor. Fig. 3 shows the extracted parameters. Based on these results one can design special microwave resonators acting as deformation tools for different plastics. The necessary power is below 20 W instead of kW with classical methods. Hence, a measurement method is now available that allows to determine the crucial parameters for energy-efficient shaping of plastics in a fast and efficient way.

## Publication

H.-E. Porteau, R. Kaempf, T. Flisgen, W. Heinrich, "Temperature dependence of the complex permittivity in microwave range of some industrial polymers", AIP Adv. vol. 12, no. 10, pp. 105007 (2022).

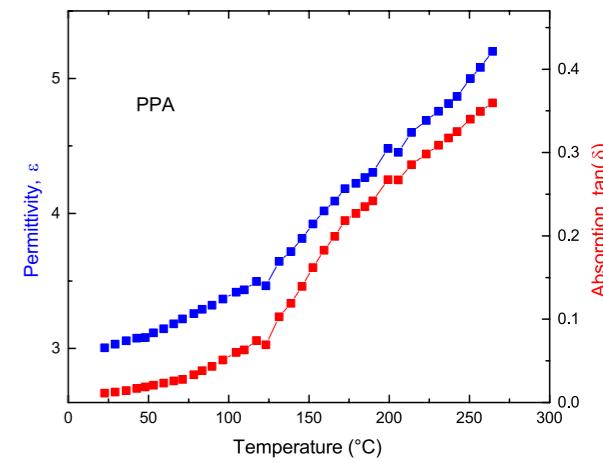


Fig. 3. Temperature dependence of the dielectric parameters for polyphthalamide (PPA).

Kunststoffe sind in unserem Alltag weit verbreitet. Umso wichtiger ist es, Umweltbelastungen in diesem Bereich zu reduzieren und Energie bei deren Bearbeitung möglichst effizient zu nutzen. Einen Ansatz bietet die Erwärmung durch Mikrowellen, da sie von Kunststoffen sehr effizient absorbiert werden. Dadurch lassen sich diese Materialien mit nur wenig Energie verformen. Die GHz-Frequenzen sind zudem vorteilhaft für diesen Zweck, weil die Wellenlänge vergleichbar mit der Größe der zu verformenden Materialbereiche ist. Das kann dazu genutzt werden, um mit geeigneten Resonatoren nicht das komplette Objekt, sondern nur die zu bearbeitenden Teile des Materials fokussiert und damit energieeffizient zu erwärmen. Weil Mikrowellen-Daten über Kunststoffe in der Literatur extrem rar sind, haben wir eine eigene Charakterisierungsmethode etabliert. Mithilfe der daraus abgeleiteten Parameter lassen sich effiziente und energiesparende Werkzeuge und Maschinen zur Materialbearbeitung entwickeln.

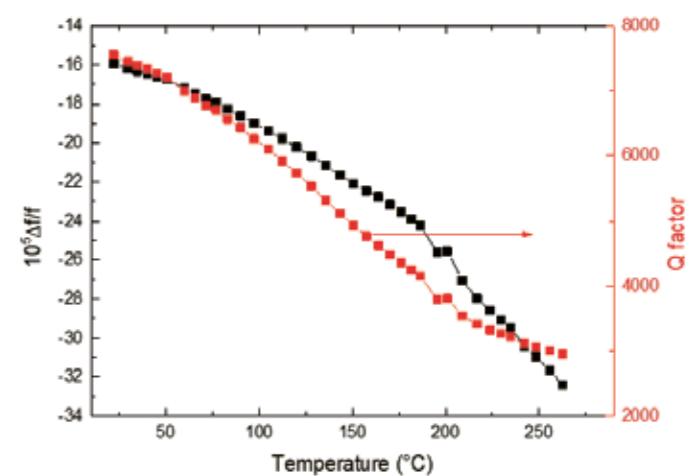
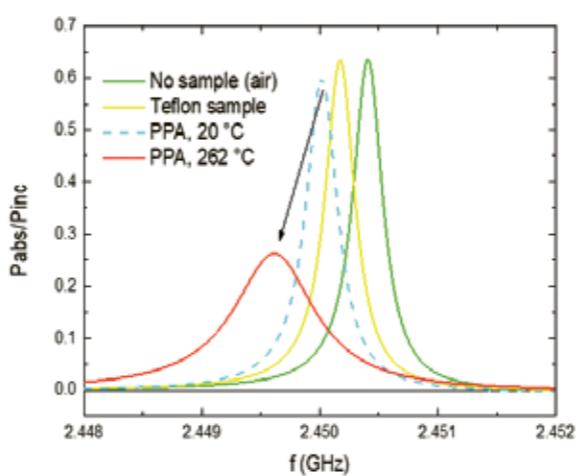


Fig. 2. Raw measurement data and their primary interpretation.

# III-V Technology

## III/V-Technologie

The research area III-V technology combines our know-how and resources at FBH in materials and process technology as well as mounting and packaging. These competencies form the basis for the development of devices in the photonics, III-V electronics and integrated quantum technology research areas.

> **Epitaxy nitrides** – heterostructures for UV LEDs, violet laser diodes, and GaN transistors. These heterostructures are the basis for the respective devices at FBH. Additionally, we develop sputtering and annealing processes for AlN templates.

> **Epitaxy arsenides** – we develop and realize heterostructures for edge-emitting GaAs laser diodes over the whole wavelength range from 620 nm – 1180 nm for FBH devices as well as for external customers. GaAs VCSELs are developed for wavelengths from 780 nm – 1060 nm as well as SAM structures for pulsed laser systems.

> **Process technology** – processes for a large variety of devices based on GaAs, InP, and GaN as well as on novel materials, such as AlN,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ , and diamond. We are implementing and constantly refining these processes on our industry-compatible and at the same time flexible process line on wafer diameters from 2" to 4" as well as on smaller samples and wafer sections.

> **Mounting & assembly** – we mount our devices onto heat sinks or into packages, hermetically sealed if required, and thus ready for integration into modules and systems.

> **Materials analytics** – supports the development of epitaxial growth processes by characterization of heterostructures. Moreover, we utilize these analysis techniques for the development of processing and mounting steps as well as for the analysis of root causes for device failure.

We also make our technological infrastructure available to external partners, for whom we carry out process steps and modules, develop fabrication technology, and deliver epitaxial wafers.

Im Forschungsbereich III/V-Technologie bündeln wir unser Know-how und unsere Ressourcen in der Material- und Prozesstechnologie sowie in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Diese bilden die Basis für die Entwicklung von Bauelementen in den Forschungsbereichen Photonik, III/V-Elektronik und Integrierte Quantentechnologie:

> **Epitaxie Nitride** – Heterostrukturen für UV-LEDs, violette Laserdioden und GaN-Transistoren. Diese Heterostrukturen sind die Basis für die Entwicklung der entsprechenden Bauelemente am FBH. Weiterhin forschen wir an Sputter- und Hochtemperatur-Prozessen für AlN-Templates.

> **Epitaxie Arsenide** – Heterostrukturen für kantenemittierende GaAs-Laserdioden im gesamten Wellenlängenbereich von 620 nm – 1180 nm sowohl für die Bauelemententwicklung am FBH als auch für externe Kunden. Wir entwickeln zudem GaAs-VCSEL für Wellenlängen von 780 nm – 1060 nm sowie SAM-Strukturen für gepulste Lasersysteme.

> **Prozesstechnologie** – Prozesse für eine Vielzahl von Bauelementen auf Basis von GaAs, InP und GaN sowie auf den neuartigen Materialien AlN,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$  und Diamant. Diese realisieren wir auf der industriekompatiblen und zugleich flexiblen Prozesslinie auf Waferdurchmessern von 2" bis 4" sowie auch auf kleineren Proben und Waferteilstücken. Die Prozesse entwickeln wir dabei beständig weiter.

> **Aufbau- und Verbindungstechnik** – die Bauelemente montieren wir auf Wärmesenken oder in Gehäuse – bei Bedarf hermetisch verschlossen – und machen sie damit für den Aufbau zu Modulen und Systemen nutzbar.

> **Materialanalytik** – unterstützt die Entwicklungen in der Epitaxie durch Charakterisierung der Eigenschaften der Halbleiterstrukturen. Diese Kompetenzen setzen wir auch für die Entwicklung von Prozess- und Montageschritten sowie für die Analyse von Ausfallursachen der entwickelten Bauelemente ein.

Wir nutzen unsere technologische Infrastruktur auch für Aufträge von externen Partnern, indem wir z.B. Prozessschritte und -module ausführen, Fertigungstechnologien entwickeln oder Epitaxiestrukturen liefern.

# AlN-based transistor epitaxy – exploiting the excellent properties of the ultra-wide bandgap material

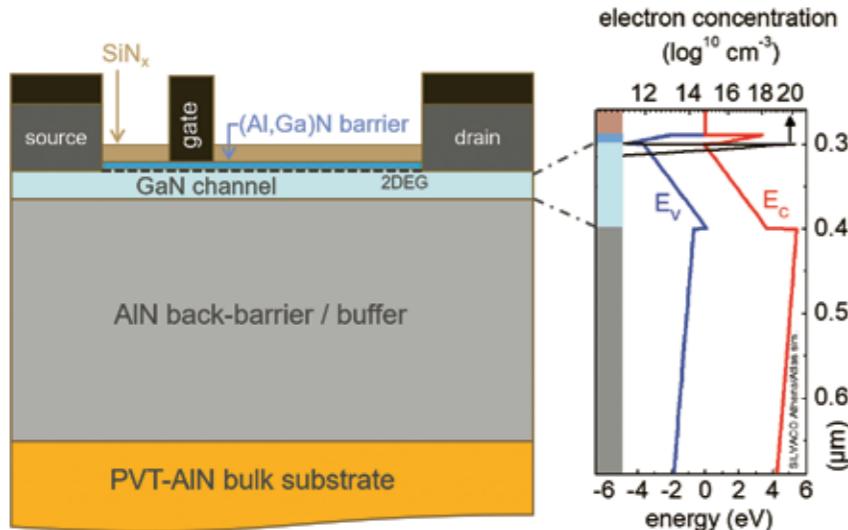


Fig. 1. Schematic of a DHFET layer structure and device layout along with calculated band structure and electron concentration.

Aluminum nitride (AlN,  $E_g \sim 6.0 \text{ eV}$ ) offers a high thermal conductivity and a high critical electric field strength. These properties make the ultra-wide bandgap material an ideal candidate for high-power and high-performance electronic devices. We have developed the concept of a double-heterostructure high-electron-mobility transistor (HEMT) using a GaN channel layer on an AlN back-barrier, thus combining the best possible current confinement with a high channel conductivity (Fig. 1). In addition, an AlN back-barrier renders compensational buffer doping unnecessary, which we expect to improve high-frequency and high-power performance.

Heteroepitaxial growth of such transistor structures on silicon carbide, sapphire, or silicon leads to a high dislocation density exceeding  $10^8 \text{ cm}^{-2}$ . Employing bulk single crystalline AlN substrates holds significant promise for reducing the number of these defects. However, the current availability of AlN substrates is limited, both in quantity and maximum substrate diameter (2 inches). Nevertheless, recent progress in AlN bulk growth through physical vapor transport (PVT) has motivated us to exploratively use AlN substrates for device epitaxy.

We carried out AlGaN/GaN/AlN growth by metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE) on  $\sim 550 \mu\text{m}$  thick (001)-oriented 1-inch

monocrystalline AlN substrates (Fig. 2). To suppress the formation of hillocks, we applied inductively-coupled plasma etching prior to MOVPE growth. This reduces subsurface damage induced by the substrate polishing process. Stress-free homoepitaxial growth on AlN is proven by in situ curvature measurements and XRD lattice constant evaluation. Fig. 3 shows XRD measurements of lattice mismatch and characteristic peak broadening of symmetric and asymmetric Bragg reflections. Growth on bulk AlN leads to much smaller peak widths compared to sapphire-based growth, indicating dislocation densities below  $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ . Since the homoepitaxial growth is nearly stress-free, the wafer bow during growth and cool-down does not change significantly, and the measured lattice constants are close to the value of relaxed AlN (Fig. 3b). Comparison of two different bulk AlN suppliers show only minor differences in structural quality, as shown in Fig. 3.

The main challenge in epitaxy lies in growing the GaN channel layer, which faces significant lattice mismatch. Partial relaxation of the channel layer with thicknesses between 120 nm and 250 nm leads to misfit dislocations at the AlN/GaN interface. Although this cannot be suppressed completely, we are investigating different concepts like strain-mediating interlayers. For example, the ternary compound  $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$  offers a lattice

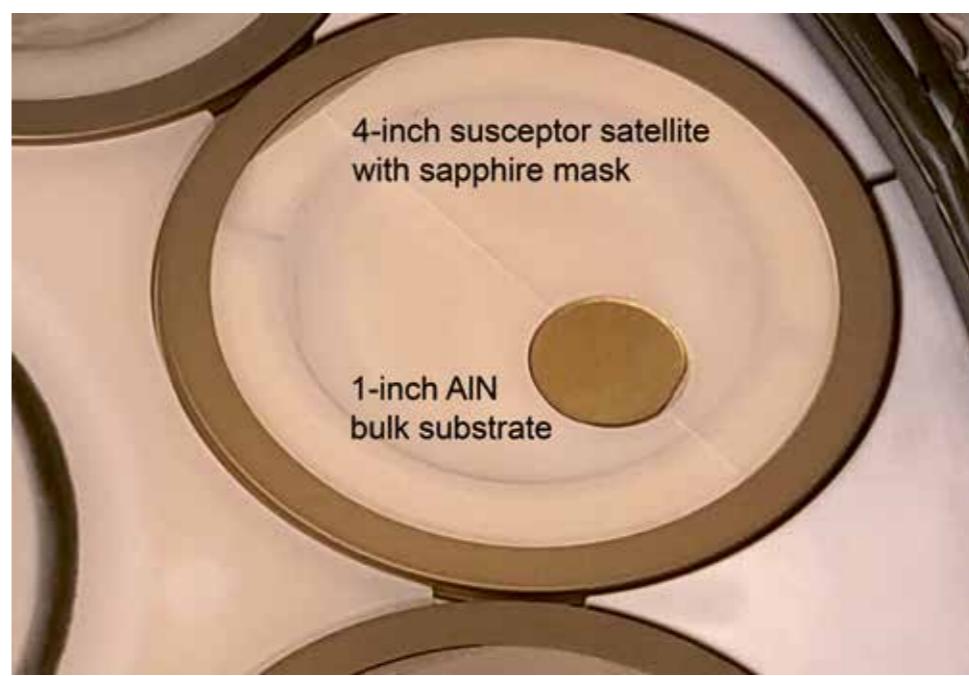


Fig. 2. MOVPE susceptor adaption for 1-inch AlN substrates.

constant close to GaN, while simultaneously acting as a back-barrier due to its high bandgap. First results of processed power electronic devices are presented on page 112. This work has been supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in the frame of the ForMikro project LeitBAN and Research Fab Microelectronics Germany (FMD), reference 16FMD02.

Dank seiner hohen Wärmeleitfähigkeit und der hohen kritischen elektrischen Feldstärke eignet sich das Halbleitermaterial Aluminiumnitrid (AlN,  $E_g \sim 6.0 \text{ eV}$ ) ideal für elektronische Bauelemente mit hoher Leistungsdichte. Da AlN-Substrate inzwischen verstärkt verfügbar sind, ist auch die defektreduzierte Epitaxie von AlN-basierten elektronischen Bauelementen möglich.

Wir haben AlGaN-Schichten durch metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE) auf  $\sim 550 \mu\text{m}$  dicken (001)-orientierten AlN-Substraten gewachsen. Das homoepitaktische Wachstum erwies sich dabei als vorteilhaft, wie Messungen der Gitterfehlanpassung und der charakteristischen Peakverbreiterung von symmetrischen und asymmetrischen Röntgen-Reflexen belegen. Die größte Herausforderung dabei ist nach wie vor das Wachstum der stark gitterfehlangepassten GaN-Kanalschicht. Wir untersuchen daher verschiedene Konzepte zur Relaxation der Verspannung bei gleichzeitig hoher Elektronenbeweglichkeit im GaN-Kanal. Erste Ergebnisse prozessierter Bauelemente auf AlN-Basis liegen inzwischen vor und werden auf Seite 112 vorgestellt.

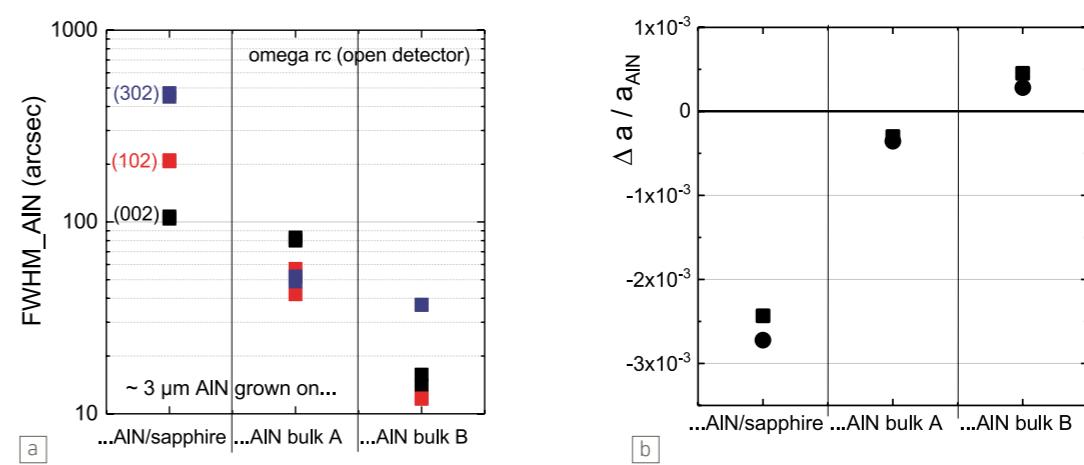


Fig. 3. X-ray diffraction analysis of peak broadening (a) and lattice mismatch (b) for AlN grown on sapphire and on bulk AlN substrates from two different vendors.

# Exploring the potential of annealed aluminum gallium nitride for optoelectronic devices – a German-Malaysian cooperation



↑ Guest scientist Assoc. Prof. Dr. Norzaini Zainal from Universiti Sains Malaysia working at FBH as Georg Foster Research Fellow of the Alexander von Humboldt Foundation.

← Fig. 1. Oven for high-temperature annealing located in FBH's epitaxy cleanroom.

The FBH has many years of experience in producing high-quality crystalline aluminum nitride (AlN) layers on sapphire substrates to fabricate ultraviolet light-emitting diodes (UV LEDs). The active part of these UV LEDs consists of aluminum gallium nitride (AlGaN) layers that are compressively strained against the AlN base layer. Managing this compressive stress is a major challenge in the pursuit of achieving high optical output power. Starting the growth process with relaxed AlGaN on sapphire substrates would help to reduce the strain-induced generation

of defects, which can decrease the light output and lead to device degradation during operation.

An established method at FBH to improve the material quality of thin AlN layers on sapphire is high-temperature annealing (HTA) at about 1700 °C. For this purpose, we use an oven in which up to twenty 2-inch diameter wafers can be annealed at the same time (Fig. 1). Investigating the applicability of the HTA process to produce high-quality AlGaN layers was therefore a

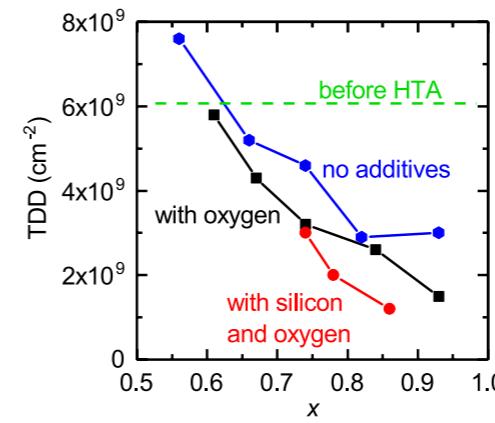


Fig. 2. Threading dislocation density (TDD) in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  plotted against the Al content  $x$  and for different impurity content after annealing.

logical step. We conducted the related studies together with Assoc. Prof. Dr. Norzaini Zainal from Universiti Sains Malaysia. Combining our experience and equipment with her knowledge in AlGaN crystal growth, we investigated HTA of AlGaN layers in detail.

One of the main results of these studies is that HTA only has a positive effect on the material quality of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers with an Al content  $x$  above 0.6. At lower Al contents, the material quality of the layers degrades due to the high temperature. We found that an increased oxygen uptake during the HTA process further reduces the threading dislocation density (TDD) in AlGaN. Additionally, it became clear that increasing the oxygen concentration helps to maintain the transparency of HTA AlGaN for UV light, which is essential for efficient light extraction through the AlGaN buffer layer.

We additionally investigated the influence of silicon on the material quality of the annealed AlGaN. Here, a reduced TDD and thus an improved AlGaN material quality was achieved for Si-doped AlGaN (Fig. 2). To prove the concept, we successfully used such annealed HTA-AlGaN layers to deposit layer structures for UVB LEDs. While other approaches employ very thick AlGaN layers ( $> 5 \mu\text{m}$ ) and patterned substrates to decrease the TDD and cope with compressive stress, our HTA approach offers the potential of high-quality thin ( $< 1 \mu\text{m}$ ) AlGaN layers – this can simplify device processing due to lower wafer curvature. Additionally, it avoids a costly substrate patterning process used by some groups to relieve compressive stress during layer growth. The fruitful collaboration between FBH and Assoc. Prof. Zainal's group will be continued with a further research stay at FBH in 2024.

We gratefully acknowledge the Alexander von Humboldt Foundation (Georg Forster Research Fellowship) for financially supporting Assoc. Prof. Dr. Norzaini Zainal during her one-year stay at FBH.

Beim Wachstum der Halbleiterschichten für UV-LEDs entsteht eine Druckspannung, die das Bauelement beeinträchtigen kann. Eine Möglichkeit damit umzugehen, ist Aluminium-Galliumnitrid (AlGaN) anstelle von AlN als Basisschicht zu verwenden. Wir setzen dazu erfolgreich die Hochtemperaturbehandlung (HTA) ein, um die Materialqualität dünner AlN-Schichten zu verbessern. Diese Methode haben wir nun gemeinsam mit Assoc. Prof. Dr. Norzaini Zainal von der Universiti Sains Malaysia auf AlGaN-Schichten erweitert. HTA erwies sich als vorteilhaft für  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichten mit einem Al-Gehalt  $x > 0.6$ . Die Dotierung mit Silizium sowie die Aufnahme von Sauerstoff während des HTA-Prozesses reduzierte die Defektdichte in AlGaN zusätzlich. Die höhere Sauerstoffkonzentration trägt auch dazu bei, die UV-Transparenz von AlGaN zu erhalten. Dadurch kann Licht effizient aus den UV-LEDs effizient ausgekoppelt werden. Die erfolgreiche deutsch-malaysische Zusammenarbeit führen wir 2024 mit einem weiteren Forschungsaufenthalt am FBH fort.

## Publications

- N. Zainal, S. Hagedorn, C. Netzel, A. Mogilatenko, M. Schön, M. Weyers, "Role of Oxygen Incorporation in High Temperature Annealed AlGaN", *Physica Status Solidi A* 220, 230083, <https://doi.org/10.1002/pssa.202300083>

- N. Zainal, S. Hagedorn, C. Netzel, M. Weyers, "High temperature annealing of Si-doped AlGaN", *Physica Status Solidi A* 2300897, <https://doi.org/10.1002/pssa.202300897>

# In situ controlled dry etching of AlGaN/GaN-based epitaxial layers – ensuring high-performance devices

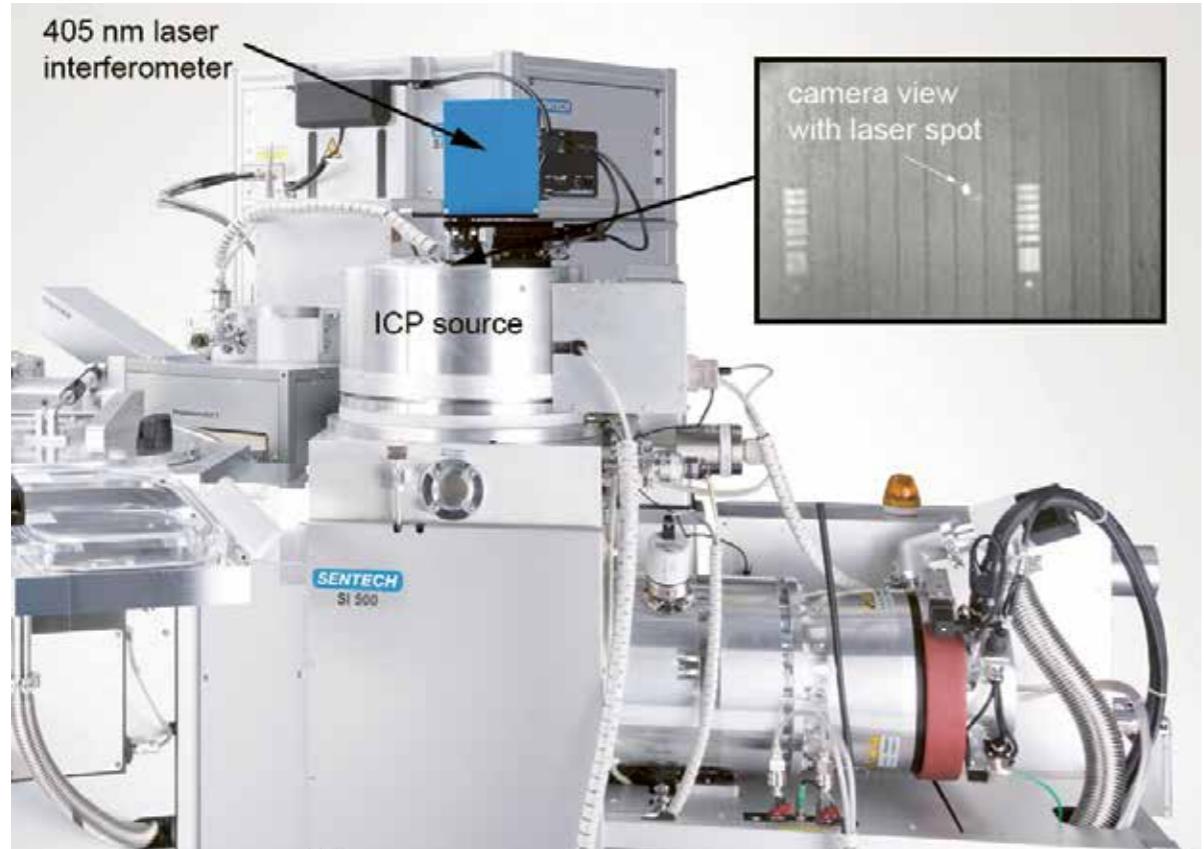


Fig. 1. ICP etching system with integrated laser interferometer operating at a measuring wave-length of 405 nm. Before starting the dry etching process, the position of the laser spot must be adjusted to the exposed area of the wafer, which is visible in the camera view shown in the inset.

Fabricating high-power laser diodes requires highly precise dry etching processes to obtain a narrow bandwidth of the light as well as high beam quality and stability. At FBH, we employ interferometry to monitor various etching processes, which allows us to precisely and directly track the etching process. For the dry etching of AlGaN/GaN-based epitaxial layers, we use an ICP etching system equipped with a laser interferometer. The measurement method is based on interference of thin films. When etching an almost transparent epi-stack, destructive and constructive interference at the material interfaces to the etched surface generates a periodic back-reflected signal.

Fig. 1 shows the etch chamber with an in situ measurement system on top of the ICP source. The 405 nm laser beam is directed through a sapphire window in the reactor lid onto the wafer

surface. It is monitored by a camera and displayed to adjust the position of the measurement spot (see inset on top right of Fig. 1).

To monitor the etch depth during a chlorine-based etching process, the reflected and interfered signals from the measurement spot are recorded. The period count of the interference signal, i.e., the oscillation amplitude and period count, depends on the material composition. It can be simulated based on material parameters of the epitaxial stack. This allows us to precisely predict and control the end of the etching process at the targeted etch depth.

Fabricating violet or blue-emitting AlGaN/GaN-based laser diodes involves a plasma etching step that needs to precisely stop at an electron blocking layer (EBL), which is quite chal-

lenging. We use an interferometer with 405 nm measurement wavelength for such shallow etching of GaN-based epitaxial layers targeting an etch depth of about 570 nm. This is because the contrast of the refractive indexes to the GaN substrate is high enough at this wavelength to generate a good interference signal. It also provides more interference periods compared to in situ measurement systems operating at wavelengths of 632 nm, 670 nm, or 980 nm. This ensures better accuracy, which is essential when etching through an almost shallow etch trench.

Fig. 2 shows the curves of the reflected signal recorded during the etching of two samples with identical epitaxial layer. It demonstrates a controlled etching process based on the simulation. Sample #1 (blue) was purposely etched deeper. Etching of sample #2 (orange) was stopped after 7.2 periods when reaching the EBL layer at 570 nm depth. The number of periods (7.2) to obtain the target depth was determined by simulation shown in the upper left corner. Due to the counting of interference periods, changes in the etch rate, as indicated by alterations of the periods of sample #1 compared to sample #2, do not affect the result. Therefore, the etch target is precisely achieved, and etching through the EBL is effectively prevented. A cross-sectional image taken of the cleaved laser ridge of sample #2 after etching (shown in the upper right part) confirms the correct etch depth.

To summarize, laser interferometry is an excellent method to precisely monitor and control dry etching for a wide variety of epitaxial materials at FBH. Depending on the materials to be etched, different measurement wavelengths are available to achieve the optimum precision.

This work was partly funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

Um Violett oder Blau emittierende Laserdioden auf AlGaN/GaN-Basis herzustellen, verwenden wir am FBH einen chlor-basierten Plasmaätzschritt. Die große Herausforderung dabei ist, dass die Ätzung genau an einer Elektronensperrschicht des epitaxierten Wafers stoppt. Die vorgegebene Zielätztiefe muss präzise und reproduzierbar erreicht werden, da sich nur so eine enge Bandbreite des Lichts, sowie eine hohe Strahlqualität und -stabilität der Laserdioden erreichen lässt.

Für das Trockenätzen von AlGaN/GaN-basierten Epitaxie-Schichten verwenden wir eine ICP-Ätzanlage. Sie ermöglicht dank eines in-situ Laserinterferometers mit eingebauter Kamera den Blick durch ein Saphir-Fenster auf den Wafer im evakuierten Reaktor. Der zur Messung verwendete Laserpunkt bei 405 nm Wellenlänge muss vor der Ätzung auf unmaskierte Bereiche der Probenoberfläche positioniert werden. Wie das Ätzbeispiel zeigt, kann der Ätzprozess durch den Vergleich mit der Simulationskurve präzise nach 7,2 Perioden gestoppt werden.

## Publication

J. H. Kang, H. Wenzel, E. Freier, V. Hoffmann, J. Fricke, O. Brox, M. Matalla, S. Einfeldt, "Continuous-wave operation of 405 nm distributed Bragg reflector laser diodes based on GaN using 10<sup>th</sup>-order surface gratings", *Photonics Research*, vol. 10, no. 5, pp.1157-1161 (2022).

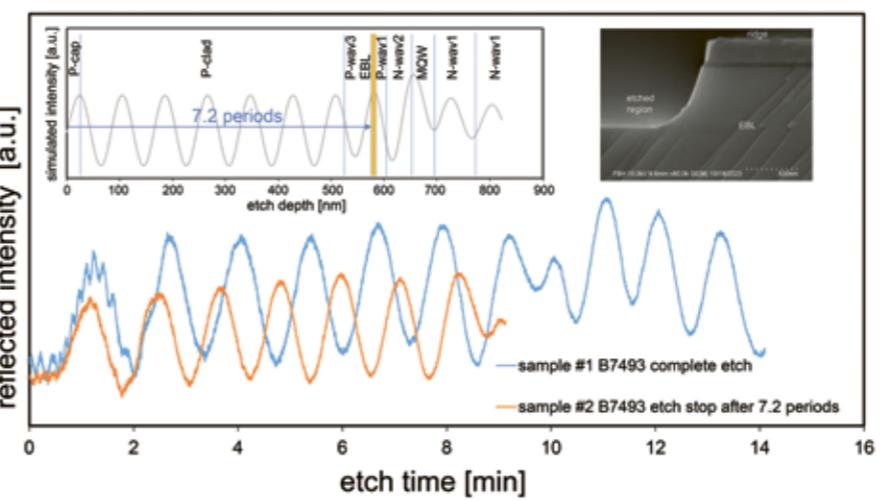


Fig. 2. Reflected intensities of etch processes of two samples with identical epitaxial structure: sample #1 (blue line) was deeper etched than sample #2 that was etched to target depth, i.e., etching stopped after 7.2 periods (orange line). The number of periods was determined based on a simulation shown in the upper left part.

# Tailoring wide-bandgap material properties using implantation and activation annealing

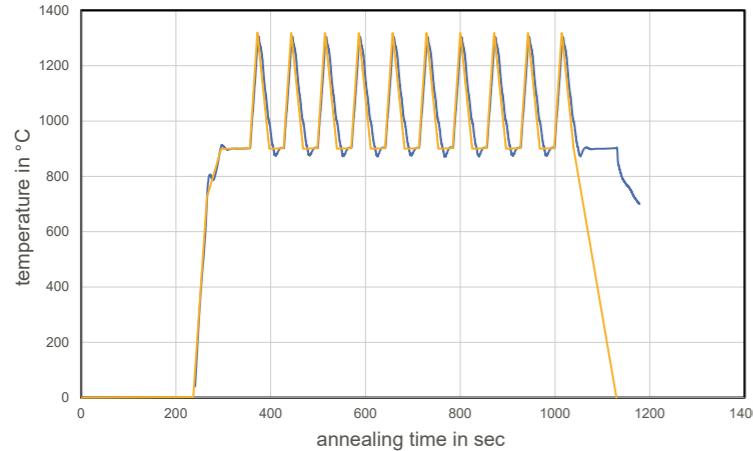


Fig. 1. Log file of an optimized pulse RTA process (10 spikes at 1250 °C)

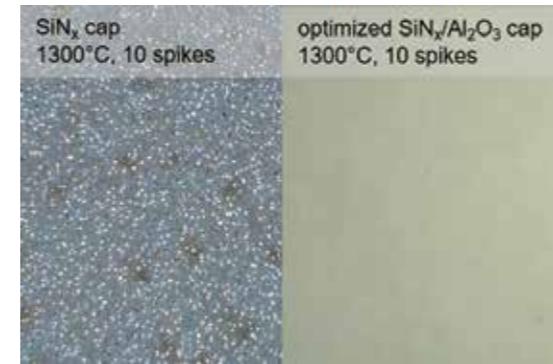


Fig. 2. Optical micrograph of a single layer Si<sub>Nx</sub> cap compared to an optimized Si<sub>Nx</sub> + ALD cap layer, after RTA at 1300 °C, 10 spikes.

Modern semiconductor technology requires materials and processes tailored to the specific needs of the targeted application. To obtain high performance, efficient, and reliable fast switching transistors, it is necessary to minimize contact resistances of n- and p-type contacts to reduce power losses. To achieve this, we use advanced materials and manufacturing processes at FBH. These methods comprise ion implantation and rapid thermal annealing that have to be tailored to the specific requirements of wide-bandgap materials like gallium oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and gallium nitride (GaN).

The development of highly doped selective area contact regions in GaN is a challenge for various reasons. Due to the high binding energy of the materials, it is difficult to introduce doping atoms into the lattice. Moreover, the doping atoms require temperatures above 1200 °C for successful activation, which is especially true for acceptors such as magnesium. Another challenge is the phenomenon of self-compensation. Additional defects are formed that neutralize the effect of the dopants. Finally, the high temperatures necessary to activate the dopants can impair the structural quality of the GaN material, which thermally decomposes at temperatures above 900 °C.

To achieve doping of selective areas, we have developed processes for the implantation of silicon, germanium, and magnesium. These elements serve either as donor or acceptor in wide-bandgap materials such as GaN and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ions are produced by sputtering from a solid target followed by ionization and acceleration energies up to 500 kV. Overlaying several implantations with various energies and doses combined with local coverage of parts of the target wafer with an implantation mask allows us to deposit the required ions in the desired dose and depth.

For subsequent activation of the dopants, a special tool for rapid thermal annealing is available at FBH. It is capable of spike annealing up to 1600 °C using halogen lamps (Fig. 1), thus achieving the high activation temperatures that are required for wide-bandgap materials. The special process control with spikes makes it possible to maintain the high temperatures only for a short time and to minimize the total thermal budget on the samples. Nevertheless, using suitable cap layers to suppress the thermal decomposition of GaN during annealing is mandatory and therefore the subject of intensive investigations and optimizations. The most promising cap layer uses a double layer approach and comprises a dense silicon nitride layer deposited by PECVD at a deposition temperature of 600 °C, followed by an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer deposited by atomic layer deposition. This

technology reduces the pinhole density and increases film integrity. Fig. 2 proves that the GaN decomposition in the spike annealing process was fully suppressed. Significant reduction of the sheet resistance down to 200 mΩ/□ is demonstrated in Fig. 3 using spike annealing.

We have advanced our capabilities to customize properties of wide-bandgap materials by combining implantation and spike annealing along with suitable cap layers to suppress the thermal decomposition. These unique proficiency will allow us to optimize next-generation fast switching and power-saving green devices that meet the demands of future generations

We gratefully acknowledge financial support by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

Leistungsstarke, effiziente, zuverlässige und schnell schaltende Transistoren erfordern möglichst geringe Übergangswiderstände von n- und p-Typ-Kontakten, um Leistungsverluste zu verringern. Am FBH nutzen wir fortschrittliche Materialien und Fertigungsverfahren wie Ionenimplantation und schnelles thermisches Ausheizen, die auf die spezifischen Anforderungen von Materialien mit großer Bandlücke zugeschnitten sind.

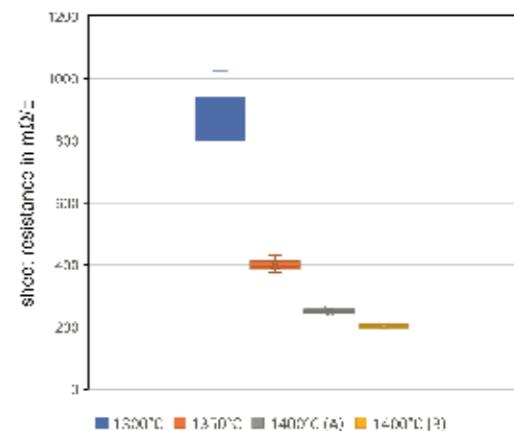
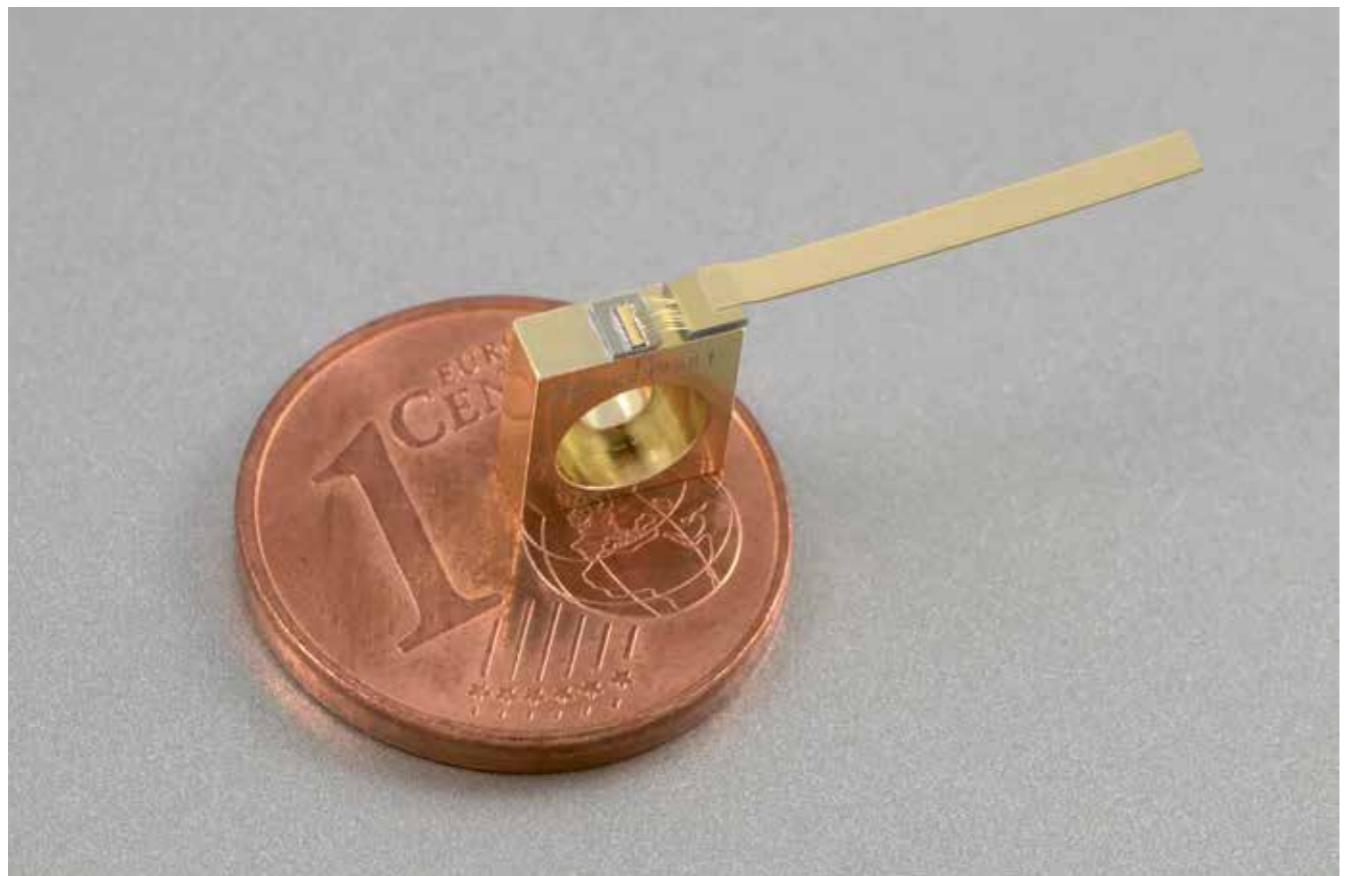


Fig. 3. Evolution of the sheet resistance with optimized annealing caps and steps.

Unter anderem haben wir ein Verfahren zur Ionenimplantation von Silizium, Germanium und Magnesium entwickelt, mit dem wir Bereiche selektiv dotieren können. Bei der daraufliegenden Aktivierung der Dotanden konkurrieren jedoch zwei Effekte: Temperaturen von mindestens 1200 °C müssen aufgewendet werden, um implantiertes Silizium effektiv zu aktivieren, allerdings zerstört sich ein Material wie etwa GaN thermisch oberhalb von 800 °C. Daher haben wir Schutzschichten aus Si<sub>Nx</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entwickelt, die diese Zersetzung unterdrücken, wodurch wir niedrige Schichtwiderstände durch hohe Ausheiltemperaturen erreichen.



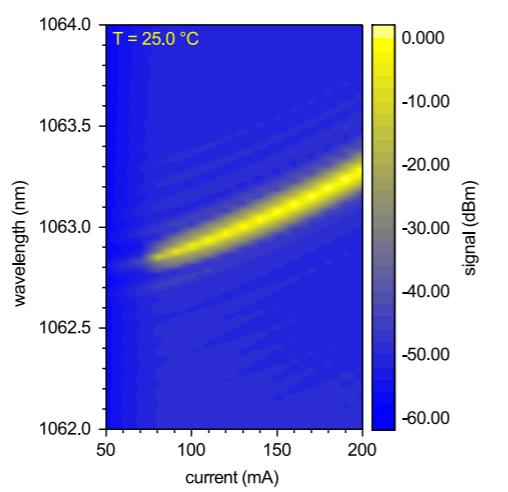
Fig. 4. (a) Wafer chamber of the high-voltage implantater. (b) Graphite box containing a wafer in the RTA chamber. The glowing halogen lamps are used to rapidly heat the wafers to high temperatures.



④ Advanced assembly approach: DFB laser diode glued to C-mount.

## Harnessing the advantage of adhesive assembly of distributed feedback laser over soldering

Compact, efficient, and robust tunable single frequency diode lasers with a narrow linewidth are key components in sensor technology and spectroscopy. Additional applications arise from the maturing quantum technology. At FBH, we manufacture GaAs-based distributed feedback (DFB) lasers in the wavelength range between 620 nm and 1180 nm that can be tuned over a wide range of operating parameters (see Fig. 1) and are capable of meeting these requirements. We engineer our DFB lasers with anti-reflection coatings on the front and rear facet as well as a grating with a quarter-wave phase shift. However, the challenge is to ensure that the desired spectral chip properties are not deteriorated by the chip assembly process, which can cause mode hops. This is due to mechanical stress that can disturb the regularity in the Bragg gratings because of the sub-micrometer dimensions of its periodic structure.



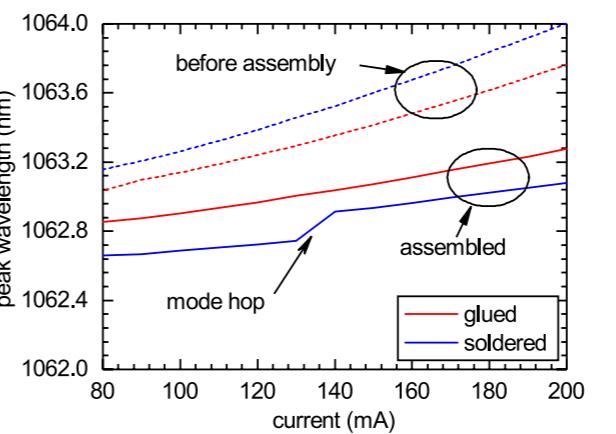
④ Fig. 1. Wavelength map of a DFB laser mounted with adhesive on C-mount with higher tunability.

In addition to the established chip soldering approach, we tested laser bonding with an adapted adhesive process. We found bonding DFB lasers with adhesive to significantly less affect the spectral tuning properties. The typical wavelength tuning of DFB lasers before and after assembly is shown in Fig. 2. Here, we clearly see that soldered chips tend to show mode hops after assembly, whereas adhesively bonded chips typically preserve their mode-hop-free tuning characteristics. However, this advantage comes at the price of a slightly higher series resistance and a marginally weaker thermal coupling. For example, measurements on ridge waveguide structures, which are comparable in structure and dimensions to those of DFB lasers, showed that the series resistance of the glued samples was about 10 % higher compared to the soldered chips. This is also consistent with the resistance values estimated from the electrical conductivity and therefore to be expected. Additionally, the slightly weaker thermal coupling reduces the achievable optical output power only negligibly, as depicted in Fig. 3. The samples bonded with adhesive achieved only about 10 % less optical power. However, this is a small price to pay for a laser with a narrow linewidth that can be tuned without mode hops when comparing the peak wavelength between soldered and glued lasers.

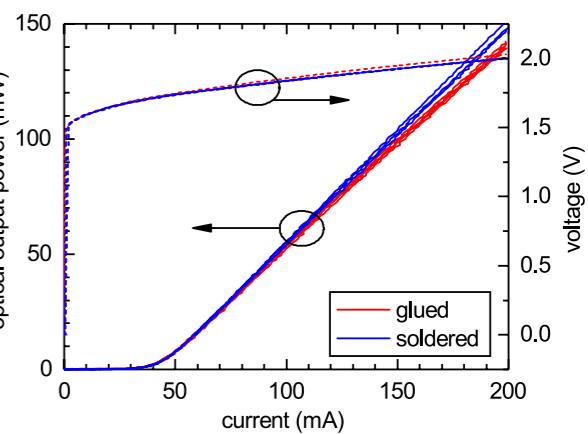
In addition, we carried out long-term behavior tests of glued DFB lasers compared to soldered ones. In temperature cycle tests followed by shearing of the samples we found no reduction of the strength of the glued joints compared to the soldered joints. In all cases, the weak point was always the GaAs chip itself. Preliminary lifetime assessment of the glued DFB lasers looks

promising and shows no significant difference in degradation behavior compared to the soldered samples. Eventually, the specific application decides which chip connection technology is more suitable. If the focus is on hop-free tunability, adhesive bonding can demonstrate its benefits. If the focus is on optical output power, soldering may be the better solution. Nevertheless, our modified approach to assembly technology offers the potential to significantly expand the range of components meeting the requirements for the above-mentioned applications.

In der Chipmontage können mechanische Spannungen die spektralen Eigenschaften von Distributed Feedback (DFB) Lasern beeinträchtigen. Diese entstehen im Lötprozess und verursachen unerwünschte Modensprünge. Am FBH haben wir eine alternative Chipmontage mit Klebstoff entwickelt, die die spektralen Eigenschaften deutlich weniger beeinflusst. Dadurch bleibt die weite modensprungfreie Durchstimmbarkeit der DFB-Chips auch nach der Chipmontage mit Klebstoff erhalten. Die geklebten Chips zeigen im Vergleich zu den gelötzten lediglich eine leicht verminderte thermische Anbindung und einen geringfügig höheren Serienwiderstand. Dies beeinflusst jedoch die Gesamtleistung kaum. Weitere Untersuchungen zum Langzeitverhalten, wie ein thermischer Zyklen- und Lebensdaueruntersuchungen der DFB-Laser, deuten darauf hin, dass die Klebung für viele Anwendungen eine attraktive Alternative zum Lötprozess darstellt.



④ Fig. 2. Comparison of the typical peak wavelength tuning of glued (red) vs. soldered (blue) DFB laser prior to (dashed lines) and after (solid lines) assembly. Soldered curve (blue solid line) with clear mode hop.



④ Fig. 3. PIV curves of glued (red) and soldered (blue) RW laser comparable to the DFB laser structure.



## Annex Anhang

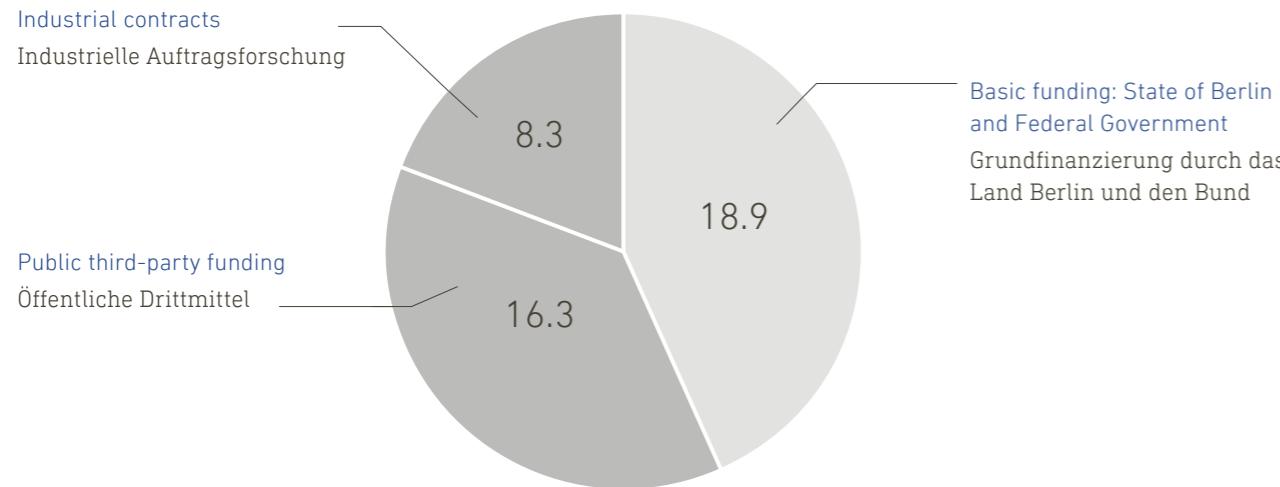
# Facts & Figures

## Zahlen & Fakten

Founded 1992  
Gegründet 1992

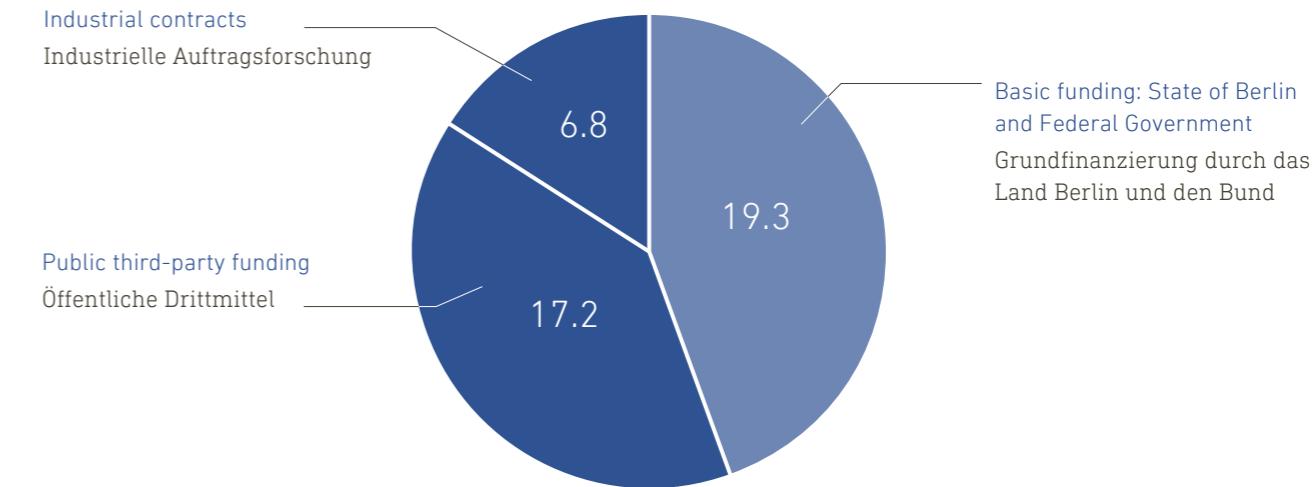
Revenue (in million Euros) | Einnahmen (Mio. Euro)

2022



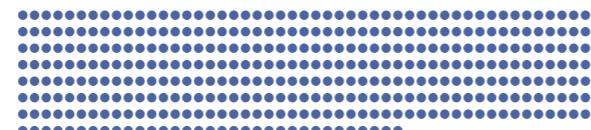
2023

2023



Staff | Team

369 383



Scientists | Wissenschaftlerinnen & Wissenschaftler

159 154



PhD candidates | Promovierende

38 48



Student assistants & bachelor/master students | Studentische Hilfskräfte & Bachelor-/Masterstudierende

26 30



Trainees | Auszubildende

8 9



2022 2023

Third-party funded projects | Drittmittelprojekte

179 180



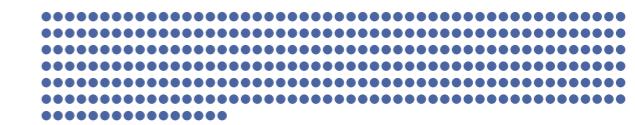
Publications (peer reviewed) | Publikationen (referiert)

99 91



Patents | Patente

339 316



Talks (invited) | Vorträge (eingeladene)

130<sup>(12)</sup> 138<sup>(28)</sup>



# Personnel & Awards

## Personalia & Auszeichnungen



### Julian Bopp honored with first prize for multipixel magnetometer

On November 14, 2023, Julian Bopp (Joint Lab Diamond Nanophotonics) was awarded the first prize at the Forum Young Excellence in Research for his work on a multipixel magnetometer. He developed it in collaboration with a cross-institutional team. It creates the conditions for compact, mobile magnet field cameras, such as those used in medical diagnostics. Find more information on p. 96 (IQT). The award comes with a research grant of 10,000 euros.

#### Julian Bopp für Multipixel-Magnetometer

##### mit 1. Preis geehrt

Am 14. November 2023 wurde Julian Bopp (Joint Lab Diamond Nanophotonics) der erste Preis beim Forum Junge Spitzenforschung für seine Arbeiten zu einem Multipixel-Magnetometer verliehen. Dieses hat er gemeinsam mit einem einrichtungsübergreifenden Team entwickelt. Es schafft die Voraussetzungen für kompakte, mobil einsetzbare Magnetfeldkameras, wie sie etwa in der medizinischen Diagnostik eingesetzt werden. Mehr Infos dazu auf S. 96 (IQT). Die Auszeichnung ist mit 10.000 Euro für Forschungsmittel dotiert.

→ Julian Bopp



Paul Tschammer (left) receives the 1<sup>st</sup> prize in the 2023 Man and Technology Competition.

Paul Tschammer (li.) nimmt den 1. Preis im Mensch- und Technik-Wettbewerb 2023 entgegen.

### Paul Tschammer mehrfach ausgezeichnet

In seiner Masterarbeit beschäftigte sich Paul Tschammer mit dem Entwurf eines hochlinearen integrierten Frequenzmixers, der in einem Medizin-Radar eingesetzt werden soll. Die Arbeit entstand im Rahmen der iCampus-Projekte in Kooperation zwischen der BTU und dem FBH und wurde von einer Fachjury des VDI Berlin-Brandenburg im Mensch- und Technik-Wettbewerb 2023 mit dem 1. Platz ausgezeichnet. Bereits zuvor hatte Paul Tschammer mit seinem Beitrag bei der Tom Brazil Fellowship Award Student Essay Competition at the European Microwave Integrated Circuits Conference 2023 (EuMIC) den 2. Platz belegt.

### Stäubli Award for innovative robotics system

Stäubli Robotics has awarded its Partner Award for innovative robot applications to Robo-Technology GmbH. The prize was given to the intuitively operable "Microbot" system, developed by the Bavarian company in collaboration with FBH. This robotic system enables, for the first time, the industry-compatible assembly of highly complex photonic modules, including those for use in space and quantum technologies.



### Stäubli Award für neuartige Robotik-Anlage

Die Firma Stäubli Robotics hat seinen Partner Award für innovative Roboteranwendungen an die Robo-Technology GmbH verliehen. Mit dem Preis wurde die intuitiv bedienbare „Microbot“-Anlage geehrt, die das bayerische Unternehmen gemeinsam mit dem FBH entwickelt hat. Die robotische Anlage ermöglicht erstmals die industrie-kompatible Montage hochkomplexer photonischer Module, u. a. für den Einsatz im Weltraum und in den Quantentechnologien.

↑ The intuitively operable robotic system "Microbot" assembles highly complex photonic modules with the utmost precision. Die intuitiv bedienbare robotische Anlage „Microbot“ montiert hochkomplexe photonische Module mit allerhöchster Genauigkeit.

### Young Author Best Paper Award for Nick Wieczorek

Nick Wieczorek from the Joint Lab Power Electronics was honored with the Young Author Best Paper Award for the paper "Characterization of GaN-on-AlN/SiC transistors towards monolithic integrability" at the EPE'23 ECCE European Conference on Power Electronics and Applications. The paper, presented the previous year, was authored by N. Wieczorek, X. Geng, C. Kuring, O. Hilt, F. Brunner, M. Wolf, J. Würfl, S. Dieckerhoff.

### Young Author Best Paper Award für Nick Wieczorek

Nick Wieczorek aus dem Joint Lab Power Electronics wurde für das Paper „Characterization of GaN-on-AlN/SiC transistors towards monolithic integrability“ auf der EPE'23 ECCE European Conference on Power Electronics and Applications mit dem Young Author Best Paper Award ausgezeichnet. Das Paper wurde im Vorjahr präsentiert und stammt von den Autor\*innen N. Wieczorek, X. Geng, C. Kuring, O. Hilt, F. Brunner, M. Wolf, J. Würfl, S. Dieckerhoff.



#### 2023 EPE ECCE Europe Young Author Best Paper Award

The FPE Association Executive Council and Power Electronics Community acknowledge the high quality of the research work by:

Nick Wieczorek

first author of the paper presented during the EPE 2022 ECCE Europe conference  
"Characterization of GaN-on-AlN/SiC transistors towards monolithic integrability"  
by Nick Wieczorek, Xiaoming Geng, Carsten Kuring, Oliver Hilt, Frank Brunner, Mibaela Wolf,  
Joachim Würfl and Sibylle Dieckerhoff, Technical University of Berlin

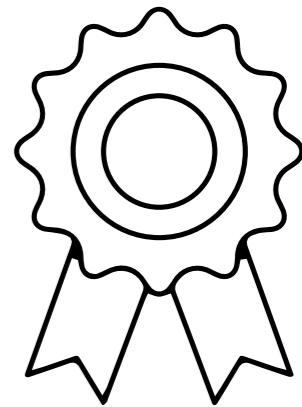
This award was presented in Aalborg, Denmark, on 7 September 2023

Pavel Bauer  
President of the Awards Committee

Jean-Luc Schenck  
President of the EPE Association

Francesco Iannuzzo  
Conference Chairman

## Outstanding publications Herausragende Publikationen



Once again last year, numerous FBH papers were among the top downloads, most-read articles, or Editor's Picks of prestigious magazines. The following publications garnered particular resonance:

Auch im letzten Jahr waren wieder zahlreiche FBH-Papers unter den Top-Downloads, meistgelesenen Artikeln oder Editor's Picks renommierter Magazine. Besondere Resonanz fanden die folgenden Publikationen:

### Applied Physics Letters

- "234 nm far-ultraviolet-C light emitting diodes with polarization doped hole injection layer" by T. Kolbe et al. was selected as Editor's Pick.
- "SnO/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction field-effect transistors and vertical p-n diodes" by K. Tetzner et al. was among the ten most-read articles in the year 2022 of the journal.
- „234 nm far-ultraviolet-C light emitting diodes with polarization doped hole injection layer“ von T. Kolbe et al. wurde als Editor's Pick ausgewählt.
- „SnO/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction field-effect transistors and vertical p-n diodes“ von K. Tetzner et al. zählte zu den zehn meistgelesenen Artikeln im Jahr 2022 des Journals.

### Applied Physics

- "Experimental and theoretical studies into longitudinal spatial hole burning as a power limit in high-power diode lasers at 975 nm" by S. Arslan et al. was selected as Editor's Pick.
- "Enhanced light extraction efficiency of far-ultraviolet-C LEDs by micro-LED array design" by J. Raß et al. was also chosen as Editor's Pick.
- „Experimental and theoretical studies into longitudinal spatial hole burning as a power limit in high-power diode lasers at 975 nm“ von S. Arslan et al. wurde als Editor's Pick ausgewählt.
- „Enhanced light extraction efficiency of far-ultraviolet-C LEDs by micro-LED array design“ von J. Raß et al. wurde ebenfalls als Editor's Pick selektiert.

### Journal of Applied Physics

- "Impact of operation parameters on the degradation of 233 nm AlGaN-based far-UVC LEDs" by J. Glaab et al. was the most-read article in the year 2022.
- "Impact of Si doping on dislocation behavior in MOVPE-grown AlN on high-temperature annealed AlN buffer layers" by A. Mogilatenko et al. was among the Top 10 most-read articles of the journal.
- „Impact of operation parameters on the degradation of 233 nm AlGaN-based far-UVC LEDs“ von J. Glaab et al. war der im Jahr 2022 meistgelesene Artikel.
- „Impact of Si doping on dislocation behavior in MOVPE-grown AlN on high-temperature annealed AlN buffer layers“ von A. Mogilatenko et al. war unter den Top 10 der meistgelesenen Artikel des Journals.

### IEEE Electron Device Letters

- "Optimization of Vertical GaN Drift Region Layers for Avalanche and Punch-Through pn-Diodes" by E. Brusaterra et al. was selected as Editor's Pick.
- „Optimization of Vertical GaN Drift Region Layers for Avalanche and Punch-Through pn-Diodes“ von E. Brusaterra et al. wurde als Editor's Pick ausgewählt.

### Electronics Letters

- "Novel 900 nm diode lasers with epitaxially stacked multiple active regions and tunnel junctions" by H. Wenzel et al. was one of the most frequently downloaded articles.
- „Novel 900 nm diode lasers with epitaxially stacked multiple active regions and tunnel junctions“ von H. Wenzel et al. zählte zu den am häufigsten heruntergeladenen Artikeln.

### Journal of Biophotonics

- "Noninvasive measurement of the 308 nm LED-based UVB protection factor of sunscreens" by S. Kobylinski et al. was one of the most frequently downloaded articles.
- „Noninvasive measurement of the 308 nm LED-based UVB protection factor of sunscreens“ von S. Kobylinski et al. war einer der am häufigsten heruntergeladenen Artikel.

### Journal of Raman Spectroscopy

- "Portable shifted excitation Raman difference spectroscopy for on-site soil analysis" by M. Maiwald et al. was not only among the top 10 % of top downloads but also one of the most cited of the journal.
- „Portable shifted excitation Raman difference spectroscopy for on-site soil analysis“ von M. Maiwald et al. zählte nicht nur zu den 10 % der Top-Downloads, sondern auch zu den meistzitierten des Journals.

### physica status solidi (a) – applications and materials science

- "Au-Free Ohmic Contact for GaN High-Electron-Mobility Transistors" by H. Yazdani et al. was among the most-read articles of the journal.
- The joint publication "Radiative Recombination and Carrier Injection Efficiencies in 265 nm Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Grown on AlN/Sapphire Templates with Different Defect Densities" by A. Muhin (TU Berlin), M. Guttmann (FBH) et al. was among the Top 10 downloaded publications.
- „Au-Free Ohmic Contact for GaN High-Electron-Mobility Transistors“ von H. Yazdani et al. gehörte zu den meistgelesenen Artikeln des Journals.
- Die gemeinsame Publikation „Radiative Recombination and Carrier Injection Efficiencies in 265 nm Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Grown on AlN/Sapphire Templates with Different Defect Densities“ von A. Muhin (TU Berlin), M. Guttmann (FBH) et al. zählte zu den Top 10 der heruntergeladenen Publikationen.

### Japanese Journal of Applied Physics

- The joint publication "High-mobility 4  $\mu$ m MOVPE-grown (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film by parasitic particles suppression" by T.-S. Chou (IKZ), K. Tetzner (FBH) et al. was selected as one of the highlight papers of the year 2023.
- Die gemeinsame Publikation „High-mobility 4  $\mu$ m MOVPE-grown (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film by parasitic particles suppression“ von T.-S. Chou (IKZ), K. Tetzner (FBH) et al. wurde als eines der Highlight-Paper des Jahres 2023 ausgewählt.



**WILEY**

**Top Downloaded Article**

Congratulations to:  
H. Yazdani, S. Chevtchenko, F. Brunner, G. Tränkle, J. Würfl  
Whose paper was one of the most downloaded\* during its first 12 months of publication in:

**PHYSICA STATUS SOLIDI (A) - APPLICATIONS AND MATERIALS SCIENCE**  
Au-Free Ohmic Contact for GaN High-Electron-Mobility Transistors  
\*Among work published in an issue between 1 January 2022 - 31 December 2022



**WILEY**

**Top Cited Article 2022-2023**

Congratulations to:  
M. Maiwald, K. Sowoldnich, B. Sumpf  
whose paper has been recognized as a top cited paper\* in:

**JOURNAL OF RAMAN SPECTROSCOPY**  
Portable shifted excitation Raman difference spectroscopy for on-site soil analysis  
\*Among work published between 1 January 2022 - 31 December 2023

# Events

## Veranstaltungen



↑ Paul Crump explains the prototype of a robotic arm with integrated laser source at Laser World of Photonics.

Paul Crump erklärt den Prototypen eines Roboterarms mit integrierter Laserstrahlquelle auf der Laser World of Photonics.

In the past year, FBH once again presented itself to the international expert audience at numerous trade shows and conferences. Both the latest advancements in research and development and the institute's complete range of services were subjects of extensive discussions.

### Event highlights for professional exchange

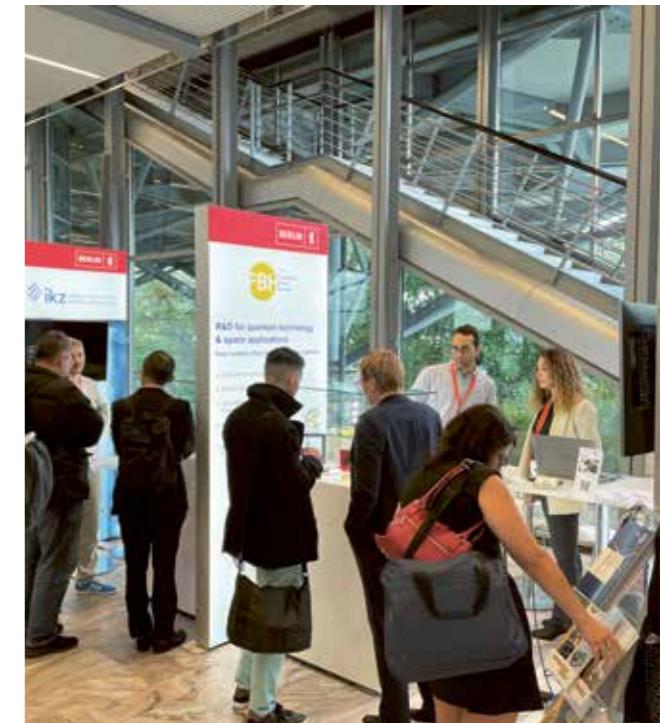
In June 2023, we presented current developments at the European photonics flagship event, **Laser World of Photonics** in Munich. Our exhibition at the Berlin-Brandenburg joint stand was very well attended – thanks in part to our highlight exhibit, the prototype of a mobile robotic arm with an integrated laser source for additive manufacturing in lightweight construction. In addition to numerous scientific presentations at the associated **CLEO Europe Conference**, we were also represented in the trade fair's program by Neysha Lobo Ploch on the Diversity Panel.

In October 2023, we presented for the first time at the **European Quantum Technology Conference** our extensive range of services in the dynamic field of quantum technology. Our scientists presented our developments in various contributions, from integrated photonic components for quantum communication to atom-based quantum technologies and integrated quantum sensors. Exhibits included our robust laser modules, which are used on sounding rockets, the international space station ISS, and satellites.

In January 2024, our offerings generated lively interest at **Photonics West**, the largest international gathering of the photonics industry. At the accompanying conference, our colleagues presented current developments in 19 contributions. With more than 22,000 registered participants, there was a veritable surge of visitors, which was also noticeable at the booth.

At **ICMOVPE XXI**, our scientists presented the latest developments in GaAs-based VCSEL structures. Current research findings in the field of microwave technology were the focus of several contributions at the **International Microwave Symposium 2023**. At **ICULTA 2023**, jointly organized by Advanced UV for Life and FBH, experts from academia and industry discussed advances and applications of UV-LED-based systems. Sustainable microelectronics and environmentally conscious digitization took center stage at both **Green ICT Connect** and **FMD Innovation Day**. Appearances at the **Microtec Academy Forum** and the networking event **Working in Photonics 2023** focused particularly on workforce development in the high-tech sector.

Furthermore, we showcased ourselves at many other platforms, including: CS Mantech, WOCSDICE – EXMATEC 2023, Compound Semiconductor Week, ISPSD 2023, IWUMD 2023, International Microwave Symposium 2023, ICALEO 2023, IEEE Photonics Conference 2023, European Semiconductor Laser Workshop, European Microwave Week 2023, CLEO 2023, International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP).



↑ FBH presents its developments at EQTC 2023.

Das FBH stellt seine Entwicklungen bei der EQTC 2023 vor.

Auch im vergangenen Jahr präsentierte das FBH sich wieder dem internationalen Fachpublikum auf einer Vielzahl von Messen und Konferenzen. Sowohl die aktuellen Fortschritte im Bereich Forschung und Entwicklung als auch das komplette Leistungsspektrum des Instituts waren Gegenstand breitgefächter Diskussionen.

### Event-Highlights mit fachlichem Austausch

Im Juni 2023 haben wir aktuelle Entwicklungen auf der europäischen Photonik-Leitmesse **Laser World of Photonics** in München vorgestellt. Unsere Ausstellung auf dem Berlin-Brandenburger Gemeinschaftsstand war sehr gut besucht – nicht zuletzt dank unseres Highlight-Exponats, dem Prototypen eines beweglichen Roboterarms mit integrierter Laserstrahlquelle für die Additive Fertigung im Leichtbau. Neben zahlreichen wissenschaftlichen Vorträgen auf der angeschlossenen **CLEO Europe Konferenz** waren wir auch im Messe-Rahmenprogramm durch Neysha Lobo Ploch auf dem Diversity Panel vertreten.

Im Oktober 2023 präsentierten wir erstmals auf der **European Quantum Technology Conference** unser umfangreiches Leistungsspektrum im dynamischen Feld der Quantentechnologie. Unsere Wissenschaftler\*innen zeigten in verschiedenen Beiträgen unsere Entwicklungen, von integrierten photoni-schen Bauelementen für Quantenkommunikation bis hin zu atombasierten Quantentechnologien und integrierten Quan-tensensoren. Zu den Exponaten zählten unter anderem unse-re robusten Lasermodule, die auf Höhenforschungsraketen, der internationalen Raumstation ISS und auf Satelliten eingesetzt werden.

Im Januar 2024 sorgte unser Angebot für reges Interesse auf der **Photonics West**, dem größten internationalen Treffen der Photonik-Branche. Auf der begleitenden Konferenz präsentierten unsere Kolleg\*innen in 19 Beiträgen aktuelle Entwick-lungen. Mit mehr als 22.000 registrierten Teilnehmenden gab es einen regelrechten Besucheransturm, der auch am Messe-stand gut zu spüren war.



At Photonics West, Neysha Lobo Ploch presented the FBH's range of services to the professional audience.  
Bei der Photonics West präsentierte Neysha Lobo Ploch dem Fachpublikum das Leistungsspektrum des FBH.

Auf der **ICMOVPE XXI** stellten unsere Wissenschaftler\*innen neueste Entwicklungen im Bereich GaAs-basierter VCSEL-Strukturen vor. Aktuelle Forschungsergebnisse auf dem Feld der Mikrowellentechnik waren das Thema mehrerer Beiträge beim **International Microwave Symposium 2023**. Auf der gemeinsam von Advanced UV for Life und dem FBH organisierten **ICULTA 2023** diskutierten Expert\*innen aus Wissenschaft und Industrie über Fortschritte und Anwendungen von UV-LED-basierten Systemen. Sowohl bei der **Green ICT Connect** wie auch beim **FMD Innovation Day** standen die Themen nachhaltige Mikroelektronik und umweltbewusste Digitalisierung im Mittelpunkt. Auftritte beim **Microtec Academy Forum** und

dem Networking-Event **Working in Photonics 2023** nahmen besonders das Thema Fachkräftesicherung im Hightech-Bereich in den Blick.

Darüber hinaus präsentierten wir uns auf vielen weiteren Plattformen, u. a.: CS Mantech, WOCSDICE – EXMATEC 2023, Compound Semiconductor Week, ISPSD 2023, IWUMD 2023, International Microwave Symposium 2023, ICALEO 2023, IEEE Photonics Conference 2023, European Semiconductor Laser Workshop, European Microwave Week 2023, CLEO 2023, International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP).



Lively interest at the FBH stand with hands-on experiments at the Girls' Technology Congress 2023.  
Reges Interesse am FBH-Stand mit Mitmach-experimenten beim Mädchen-Technik-Kongress 2023.

Tim Schröder (right) at the interdisciplinary panel discussion on quantum creativity.  
Tim Schröder (r.) bei der interdisziplinären Paneldiskussion über Quantenkreativität.



## FBH in dialogue: research for everyone

In May 2023, we once again opened our doors for **Girls'Day**. Girls from the fifth grade stepped into the roles of microtechnologists and scientists, conducting experiments in our labs. Just like the girls at **Mädchen-Technik-Kongress 2023** (Girls' Technology Congress 2023), organized by the high-technology education and training network ANH Berlin located at FBH, they gained practical insights into their prospects in fields where men still dominate. Career opportunities in high-tech were also introduced by our training network at the **Ausbildungs-Allianz-Adlershof 2023** (Adlershof Training Alliance 2023) and further training and internship fairs.

Under the motto "Speed dating with Science", the format **Book a Scientist** brings experts from the Leibniz Association together for individual discussions with interested parties. Tim Schröder

participated on the topic of "Technologies with Glamour Factor" in fall 2023. As part of the Science Week, he also took part in **Daring to Explore Quantum Creativity**, an interdisciplinary event on the potential of quantum creativity. In fall 2023, Markus Krutzik gave a lecture on integrated quantum sensors as part of the **Physics & Pizza** series of the German Physical Society. He also served as a co-host of the two-day **QTX-7 Workshop on Quantum Technologies on Small Satellites**.

In the podcast series **Weiß der Adler** by FluxFM, Danilo Höpfner explores the Adlershof science and media hub. In July 2023, Sven Einfeldt and Neysha Lobo Ploch were guests, discussing our UVC LEDs and their applications in the medical field.

## FBH im Dialog: Forschung für alle

Im Mai 2023 öffneten wir wieder unsere Türen zum **Girls'Day**. Mädchen ab der fünften Klasse schlüpften in die Rolle von Mikrotechnologinnen und Wissenschaftlerinnen und experimentierten in unseren Laboren. Genau wie beim **Mädchen-Technik-Kongress 2023**, der von dem am FBH angesiedelten Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie ANH Berlin organisiert wurde, bekamen sie einen praxisnahen Blick auf ihre Perspektiven in Berufen, in denen noch immer meist Männer arbeiten. Karrieremöglichkeiten im Hochtechnologie-Bereich präsentierte unser Ausbildungsnetwork auch auf der **Ausbildungs-Allianz-Adlershof 2023** sowie weiteren Ausbildungs- und Praktikumsmessen.

Unter dem Motto „Speeddating mit der Wissenschaft“ bringt das Format **Book a Scientist** Expert\*innen der Leibniz-Gemeinschaft zu einem individuellen Einzelgespräch mit Inter-

essierten zusammen. Tim Schröder war im Herbst 2023 zum Thema „Technologien mit Glamourfaktor“ dabei. Im Rahmen der Science Week nahm er außerdem am Themenabend **Daring to Explore Quantum Creativity** teil, einer interdisziplinären Veranstaltung über das Potenzial der Quantenkreativität. Im Herbst 2023 hielt Markus Krutzik im Rahmen der Reihe **Physik & Pizza** der Deutschen Physikalischen Gesellschaft einen Vortrag über integrierte Quantensensoren. Außerdem trat er als Co-Host des zweitägigen **QTX-7 Workshops on Quantum Technologies on Small Satellites** auf.

In der Podcast-Reihe **Weiß der Adler** von FluxFM führt Danilo Höpfner durch den Wissenschafts- und Medienstandort Adlershof. Im Juli 2023 waren Sven Einfeldt und Neysha Lobo Ploch zu Gast und sprachen über unsere UVC-LEDs und ihre Anwendungen im medizinischen Bereich.



# Structure of the Institute

## Institutsstruktur

The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organizes its research activities in labs and departments within its four research areas: III-V technology, III-V electronics, photonics, and integrated quantum technology. Here, FBH cooperates closely with universities in the framework of joint labs. It maintains an efficient administration that supports research and development in areas like human resources, finance and controlling, procurement, and IT services. The technical services team ensures the smooth operation of laboratories and clean-rooms. A process-oriented quality management system and the communications unit complement FBH competencies. With its science management, the institute additionally promotes vocational training and further education in high technology and related research in this field.

FBH gGmbH has been a 100 % subsidiary of the State of Berlin since 01.01.2021 and is a member of the Leibniz Association.

The Leibniz Association connects 96 independent research institutions that range in focus from natural, engineering, and environmental sciences to economics, spatial and social sciences, and the humanities. Leibniz Institutes address issues of social, economic and ecological relevance. The Leibniz Institutes employ around 20,500 people. The financial volume amounts to 2 billion euros.

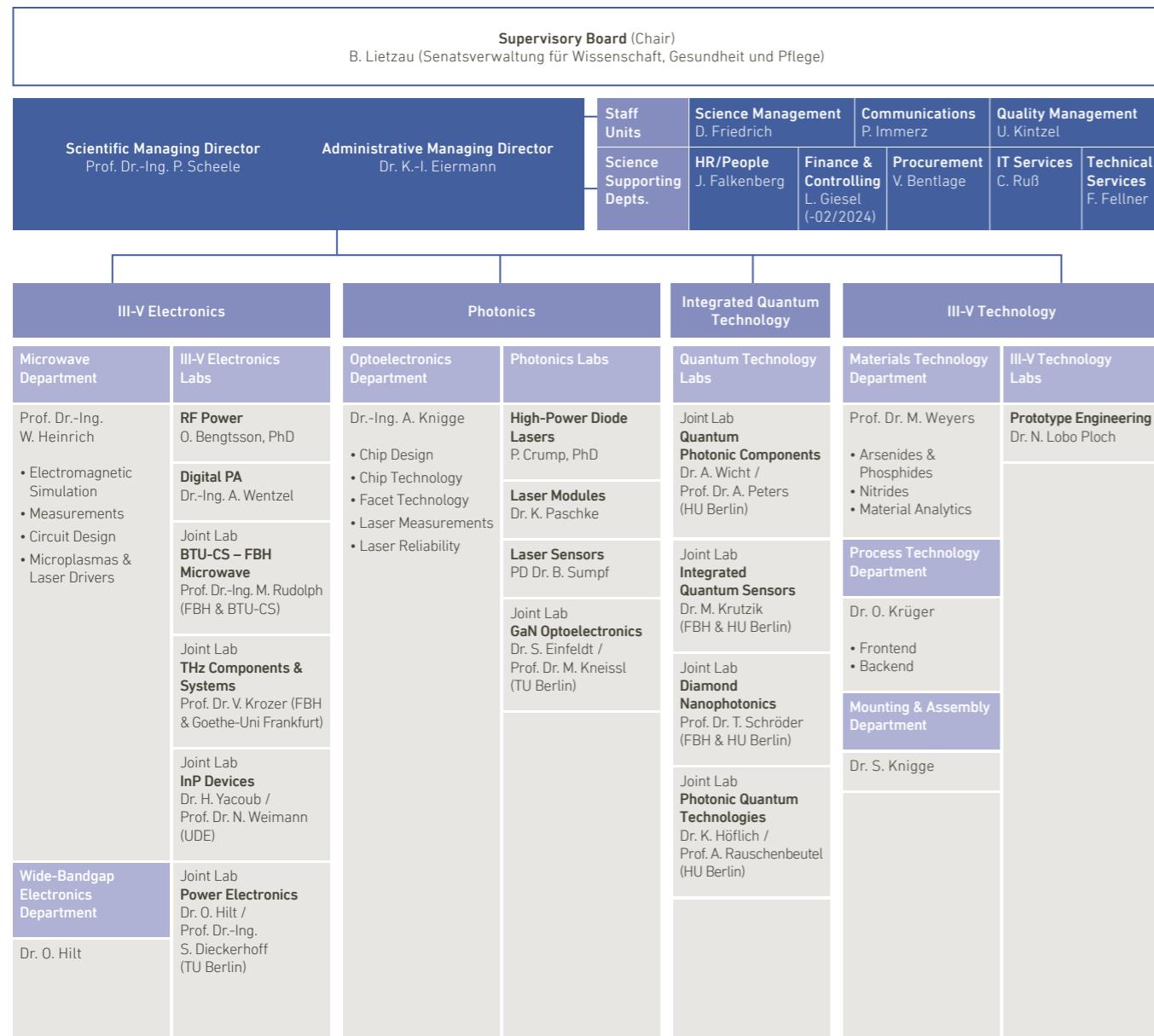
Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organisiert seine Forschungsaktivitäten in Departments und Labs in den vier Forschungsbereichen III/V-Technologie, III/V-Elektronik, Photonik und Integrierte Quantentechnologie. Hierbei kooperiert das FBH im Rahmen von Joint Labs eng mit Universitäten. Es verfügt über eine effiziente Verwaltung, die die Forschung und Entwicklung in den Bereichen Personalwesen, Finanzen und Controlling, Beschaffung und IT-Dienste unterstützt. Für den reibungslosen Betrieb der Labore und Reinräume sorgt das Team der Technischen Dienste. Der Stab wird ergänzt durch ein prozessorientiertes Qualitätsmanagement und den Bereich Kommunikation. Mit seinem Wissenschaftsmanagement fördert das Institut darüber hinaus die berufliche Aus- und Weiterbildung in der Hochtechnologie und Begleitforschung in diesem Bereich.

Die FBH gGmbH ist seit 01.01.2021 eine 100-prozentige Tochter des Landes Berlin und ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft.

Die Leibniz-Gemeinschaft verbindet 96 selbständige Forschungseinrichtungen. Ihre Ausrichtung reicht von den Natur-, Ingenieur- und Umweltwissenschaften über die Wirtschafts-, Raum- und Sozialwissenschaften bis zu den Geisteswissenschaften. Leibniz-Institute widmen sich gesellschaftlich, ökonomisch und ökologisch relevanten Fragen. Die zugehörigen Institute beschäftigen rund 20.500 Personen. Das Finanzvolumen liegt bei 2 Milliarden Euro.

# Organizational chart

## Organigramm



## **Scientific advisory board**

### Wissenschaftlicher Beirat

Chair | Vorsitz

Prof. Dr. Ulrike Grossner  
ETH Zürich (CH) (as of/ab 01.04.2024)

Members | Mitglieder

- |   |   |
|---|---|
| Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar, Universität Siegen                               | Dr. Kolja Nicklaus, Space Tech GmbH, Immenstaad                         |
| Prof. Dr. Kai Bongs, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Ulm              | Prof. Dr.-Ing. Ilona Rolfes, Ruhr-Universität Bochum                    |
| Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bösch, Technische Universität Graz (A) (until/bis 31.03.2023) | Dr. Berthold Schmidt, TRUMPF SE + Co. KG, Ditzingen                     |
| Dr. Franz Dielacher, Villach (A)  | Dr. Ulrich Steegmüller, Aledia, Échirolles (FR) (until/bis 31.03.2023)  |
| Prof. Dr. Friedel Gerfers, Technische Universität Berlin                              | Prof. Jelena Vuckovic, Stanford University (USA) (until/bis 31.03.2023) |
| Dr. Siegbert Martin, Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang                           | Prof. Dr. Andreas Waag, Technische Universität Braunschweig             |

# **Supervisory board of the FBH gGmbH**

## Aufsichtsrat der FBH gGmbH

Chair | Vorsitz

Bernd Lietzau  
Senatsverwaltung für Wissenschaft, Gesundheit und Pflege

Members | Mitglieder

- |   |  |
|---|--|
| Melanie Rüther – stellvertretende Vorsitzende<br>Bundesministerium für Bildung und Forschung<br>(until/bis 07.07.2023)              | Dr. Ramona Eberhardt<br>Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik<br>IOF, Jena |
| MinDirig Engelbert Beyer – stellvertretender Vorsitzender<br>Bundesministerium für Bildung und Forschung<br>(as of/seit 08.07.2023) | Sylvia Richter<br>Infineon Technologies AG, Neubiberg  |
| Marina Bauer<br>Senatsverwaltung für Finanzen, Berlin   | Dr. Christian Schmitz<br>TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen (until/bis 30.06.2023)                |
| Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth<br>Universität Stuttgart   | Dr. Hagen Zimer<br>TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen (as of/seit 01.07.2023)                     |

# How to get in touch

## Wie Sie uns erreichen

Ferdinand-Braun-Institut gGmbH,  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik  
Gustav-Kirchhoff-Str. 4  
12489 Berlin, Germany

Phone +49.30.6392-2600  
Fax +49.30.6392-2602  
Email fbh@fbh-berlin.de  
Web www.fbh-berlin.de

**Scientific Managing Director**  
Wissenschaftlicher Geschäftsführer  
Prof. Dr.-Ing. Patrick Scheele

Phone +49.30.6392-2601  
patrick.scheele@fbh-berlin.de

**Administrative Managing Director**  
Administrative Geschäftsführerin  
Dr. Karin-Irene Eiermann

Phone +49.30.6392-58003  
irene.eiermann@fbh-berlin.de

**Assistant to the Management | Referentin der Geschäftsführung**  
Science Management | Wissenschaftsmanagement  
Doreen Friedrich, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH)

Phone +49.30.6392-3391  
doreen.friedrich@fbh-berlin.de

**Assistant to the Administrative Managing Director**  
Referentin der Administrativen Geschäftsführerin  
Dr. Sabine Spohner

Phone +49.30.6392-58005  
sabine.spohner@fbh-berlin.de

**Communications | Kommunikation**  
Petra Immerz, M.A.

Phone +49.30.6392-2626  
petra.immerz@fbh-berlin.de

### Central contact for research areas

Fachliche Ansprechpersonen für die Forschungsbereiche

**Photonics | Photonik**  
Prof. Dr.-Ing. Patrick Scheele

Phone +49.30.6392-2601  
patrick.scheele@fbh-berlin.de

**III-V Electronics | III/V-Elektronik**  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

Phone +49.30.6392-2620  
wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de

**Integrated Quantum Technology**  
Integrierte Quantentechnologie  
Dr. rer. nat. Andreas Wicht

Phone +49.30.6392-3958  
andreas.wicht@fbh-berlin.de

**III-V Technology | III/V-Technologie**  
Prof. Dr. rer. nat. Markus Weyers

Phone +49.30.6392-2670  
markus.weyers@fbh-berlin.de



## Imprint

### Impressum

**Ferdinand-Braun-Institut gGmbH**  
**Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik**  
Gustav-Kirchhoff-Str. 4  
12489 Berlin, Germany

Phone +49.30.6392-2600  
Email [fbh@fbh-berlin.de](mailto:fbh@fbh-berlin.de)  
Web [www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)

All rights reserved. Reproduction requires permission of the Management of the Institute.  
Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck nur mit Genehmigung der Geschäftsführung.

© Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Berlin  
06/2024

### Editors | Redaktion

Petra Immerz, Dr. Aiko Onken

### Layout | Gestaltung

telegrafik berlin

### Printing | Druck

Umweltdruck Berlin GmbH

This annual report was produced eco-friendly & climate-neutral.

Dieser Jahresbericht wurde umweltfreundlich & klimaneutral produziert.

### Images & Graphics | Fotos & Grafiken

B. Schurian: pp. 1, 24, 27, 74 (inset), 80, 81, 85  
M. Baumbach: pp. 2, 7, 8, 14, 18, 28, 33, 37,  
47, 58, 60, 61, 65, 134, 146, 151  
C. Ruß: p. 6  
P. Immerz: pp. 16, 25, 32, 34, 35 (top), 39, 40,  
42, 53, 54, 55, 66, 72, 111, 112, 118, 132, 142,  
144, 145 (center)  
ANH Berlin: pp. 21, 22, 23, 145 (top)  
FMD: pp. 26, 29  
M. Maiwald: p. 30  
Photon Laser Manufacturing: p. 35 (bottom)  
G. Gurr: pp. 38, 63  
Robo Technology: pp. 41, 138 (right)  
DLR: p. 43  
ESA/ATG Medialab: pp. 44/45  
Trumpf: p. 57  
EUMW: p. 62  
Sentech: p. 128  
Humboldt Innovation: p. 138 (left)  
VDI-BB/M. Diehl: p. 139  
Berlin Partner/S. Gumz: p. 143  
further | weitere: FBH or private



For further information please visit our website

Weitere Informationen finden Sie auf unserer Website



Direct access to the current and previous annual reports

Hier geht es zum aktuellen und den früheren Jahresberichten



Leibniz  
**Ferdinand  
Braun  
Institut**

**Ferdinand-Braun-Institut gGmbH**  
**Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik**  
Gustav-Kirchhoff-Str. 4  
12489 Berlin, Germany  
[www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)