

ANNUAL REPORT JAHRES BERICHT



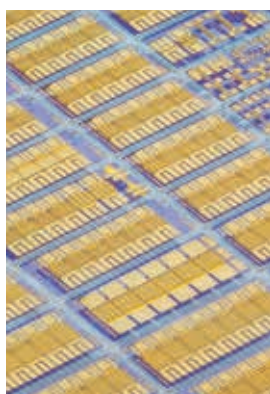
2



3



2



2



2022
2023

2022 | 2023

**ANNUAL
REPORT**
JAHRES
BERICHT

Editorial

Vorwort



Fit for the future! They are used on a daily basis, yet rarely consciously perceived. Semiconductor chips are the "hidden champions" of our everyday lives, so to speak. The tiny devices improve energy efficiency, enable advances in renewable energies, and help in medical diagnostics and treatment. They drive innovation in electric vehicles and intelligent traffic management. When it comes to tackling pressing global challenges, they are indispensable. Because without chips, there is no digitization! They lay the foundation for progress in artificial intelligence, the buzzworthy Industry 4.0 in manufacturing, and pioneering research endeavors.

The global appetite for high-frequency and optoelectronic chips is growing at a rapid pace. Consequently, a nation's technological innovation prowess and economic strength are inextricably linked to semiconductor manufacturing. The envisaged expansion of European manufacturing capacities is therefore of central importance in order to prevail and remain competitive in an increasingly digital-centric world.

Fit für die Zukunft! Sie werden tagtäglich benutzt, jedoch nur selten bewusst wahrgenommen. Halbleiterchips sind sozusagen die „Hidden Champions“ unseres Alltags. Die winzigen Bauelemente verbessern die Energieeffizienz, ermöglichen Fortschritte bei den erneuerbaren Energien und helfen bei der medizinischen Diagnostik und Behandlung. Sie treiben Innovationen bei Elektrofahrzeugen und dem intelligenten Verkehrsmanagement voran. Für die drängenden globalen Herausforderungen sind sie unverzichtbar. Denn ohne Chips keine Digitalisierung! Sie liefern die Grundlage für Fortschritte in der künstlichen Intelligenz, der Fertigung – Schlagwort Industrie 4.0 – und der Forschung.

Die weltweite Nachfrage nach Hochfrequenz- und optoelektronischen Chips steigt rasant. Damit sind auch die technologische Innovationkraft und wirtschaftliche Stärke eines Landes eng mit der Halbleiterfertigung verbunden. Der geplante Ausbau der europäischen Fertigungskapazitäten ist daher von zentraler Bedeutung, um in einer zunehmend digitalen Welt bestehen und wettbewerbsfähig bleiben zu können.

For more than 30 years, we have been contributing to the research and development of compound semiconductors in the fields of photonics, high-frequency electronics, and quantum technologies. This involves close cooperation with partners from both science and industry as an integral part of value chains. We also pool our know-how and high-performance resources in major alliances such as the Research Fab Microelectronics Germany (FMD). Joint projects are addressing resource-efficient information and communications technology (Green ICT) as well as quantum and neuromorphic computing. To bridge the gap between basic and application-oriented research, we cooperate with universities from all over Germany within the framework of joint labs.

With a new management team, the course for the future of the Ferdinand-Braun-Institut is well set. At the turn of the year 2023/24, Patrick Scheele will start his position as Scientific Managing Director. He completes the management team with his expertise in high-frequency electronics and the management of large research teams. Karin-Irene Eiermann has already been in charge as Administrative Managing Director since fall 2022. She is responsible for professionalizing the science supporting departments.

We look back at a successful year with excellent results. A special thank you goes to the many dedicated colleagues at our institute for their tireless efforts – from administration to the technology teams in the labs and cleanrooms to the scientists from our labs and departments. They are all vital to our success. We are also grateful for the generous financial support provided by the State of Berlin and the Federal Government, which enables us to perform cutting-edge research at an international level. Likewise, we greatly appreciate the long-standing, trusting cooperation with our partners and customers from science and industry. We look forward to working with you on further exciting projects!

We have compiled the results and events from the past year here and wish you a stimulating read,

Günther Tränkle & Karin-Irene Eiermann

Seit mehr als 30 Jahren leisten wir in den Bereichen Photonik, Hochfrequenzelektronik und Quantentechnologien unseren Beitrag zur Forschung und Entwicklung von Verbindungshalbleitern. Wir kooperieren dabei eng vernetzt und als integraler Bestandteil von Wertschöpfungsketten mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Unser Know-how und unsere leistungsfähigen Ressourcen bündeln wir darüber hinaus in großen Verbänden wie der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD). Gemeinsam bearbeiten wir Projekte zur ressourcenschonenden Informations- und Kommunikationstechnik (Green ICT) und zum Quanten- und neuromorphen Computing. Die Brücke zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung schlagen wir im Rahmen von mittlerweile neun Joint Labs mit Universitäten aus ganz Deutschland.

Mit einem neuen Führungsteam sind die Weichen für die Zukunft des Ferdinand-Braun-Instituts gut gestellt. Zum Jahreswechsel 2023/24 wird Patrick Scheele als neuer wissenschaftlicher Geschäftsführer am FBH beginnen. Er komplettiert das Führungsteam fachlich mit seiner Expertise aus der Hochfrequenzelektronik und dem Management großer Forschungsteams. Bereits seit Herbst 2022 ist Karin-Irene Eiermann als administrative Geschäftsführerin im Amt. Sie ist zuständig für die Professionalisierung der wissenschaftsunterstützenden Bereiche.

Wir blicken auf ein erfolgreiches Jahr mit ausgezeichneten Ergebnissen zurück. Den vielen engagierten Kolleginnen und Kollegen unseres Instituts danken wir für ihren unermüdlichen Einsatz – ob in Administration, den Technologie-Teams in Laboren und Reinräumen oder den Wissenschaftler*innen aus den Labs und Departments. Sie alle sind unverzichtbar für unseren Erfolg. Unser Dank gilt auch den Zuwendungsgebern des Landes Berlin und des Bundes, die unsere Forschung auf internationalem Spitzenniveau mit ihrer großzügigen finanziellen Unterstützung ermöglichen. Auch die langjährige, vertrauensvolle Zusammenarbeit mit unseren Partnern und Kunden aus Wissenschaft und Industrie wissen wir sehr zu schätzen. Wir freuen uns auf weitere spannende Projekte!

Die Ergebnisse und Ereignisse aus dem letzten Jahr haben wir hier zusammengefasst. Eine anregende Lektüre wünschen Ihnen

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

52 Photonics Photonik

- 54 Innovation in device technology for brightness-scaling in high-power broad area lasers
- 56 Impact of carrier capture on power saturation of pulsed-driven quantum-well lasers
- 58 2 kW pulse power wavelength-stabilized diode laser bar for LiDAR applications
- 60 Picosecond pulses with 40W peak power from a tapered laser diode for THz applications
- 62 Micromodules with integrated high-performance amplifiers for medical technology
- 64 A versatile light source: 785 nm dual-wavelength Y-branch lasers suited for Raman spectroscopy and THz generation
- 66 Using Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy for quality control of animal feed pellets
- 68 Reliable GaN-based laser sources for quantum technology
- 70 Ultraviolet micro-LEDs and arrays with enhanced efficiency are opening up novel applications
- 72 In-depth spatially resolved investigations on UV LEDs to understand their degradation

74 Integrated Quantum Technology Integrierte Quantentechnologie

- 76 Laser modules for basic research on the International Space Station
- 78 Next-generation ECDL-MOPA laser modules for potassium spectroscopy – paving the way for industrial applications
- 80 Towards a micro-integrated optically pumped magnetometer for biomedical applications
- 82 Deterministic creation and engineering of quantum emitters in silicon carbide
- 84 Fabrication of suspended photonic crystal cavities in diamond

86 III-V Electronics III/V-Elektronik

- 88 An integrated HBT and p-n-diode MMIC process for mm-wave applications
- 90 Heterointegration of InP-on-BiCMOS enabling transitions up to 325 GHz
- 92 Gate module optimization for GaN-based Q-band RF transistors targeting communication systems
- 94 AlN-based transistors on crystalline AlN substrates for mm-wave and high-voltage switching
- 96 Vertical β -Ga₂O₃ FinFET devices for next-generation power applications
- 98 A 4 GHz digital class-E outphasing PA for highly efficient 5G base stations
- 100 Common-gate low-noise amplifier with built-in switching feature for 5G mobile communication
- 102 AlGaIn/GaN-based THz detector and detector arrays for THz cameras
- 104 Tracing the electron motion in plasma – a powerful characterization tool for ICP plasmas

106 III-V Technology III/V-Technologie

- 108 Closing the wavelength gap – laser diodes around 700 nm with GaInAsP quantum wells
- 110 Aiming to reduce energy consumption – drift layers for vertical GaN power transistors
- 112 A unique tool for sputtered iridium gate technology
- 114 MES Go-Live – customizing our digital R&D environment

116 Annex Anhang

- 118 Facts & Figures
Zahlen & Fakten
- 120 Personnel & Awards
Personalien & Auszeichnungen
- 125 Events
Veranstaltungen
- 130 Structure of the Institute
Institutsstruktur
- 134 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 Bedarfsweldern 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

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 mikointegrierte 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

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 R&D cooperations. 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 Verbänden 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 **anerkanntes, 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

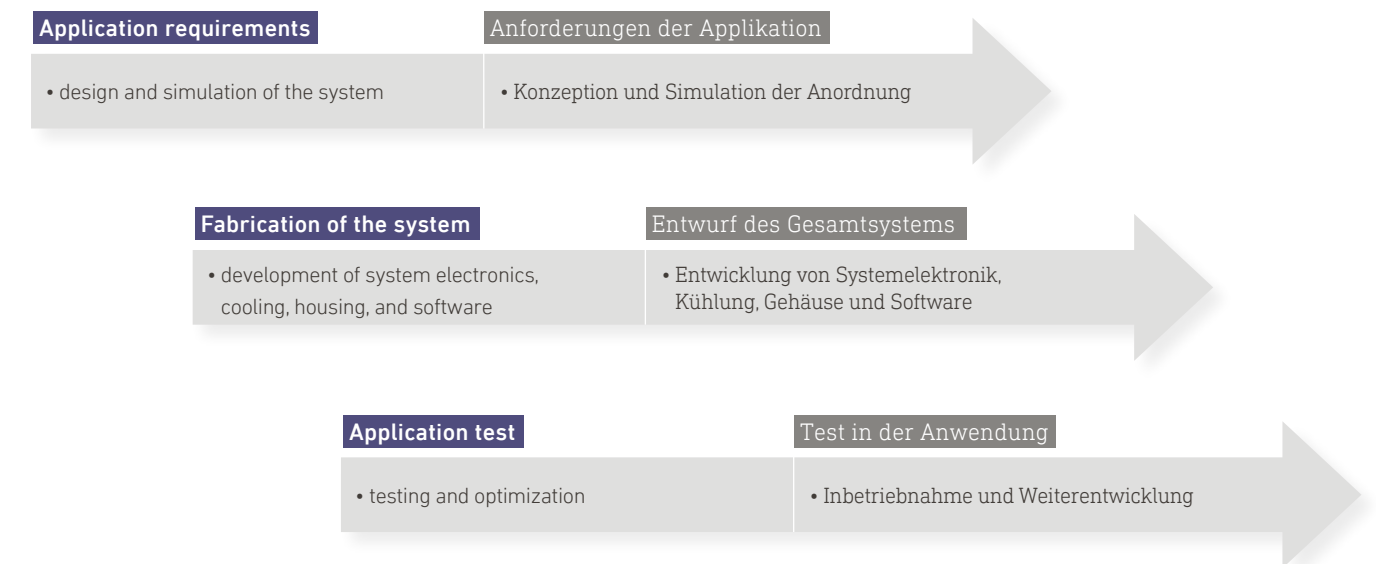


Hand in hand – making research usable

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. The developed 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:



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

type development always has the application and intuitive operation in mind.

Our team combines the interdisciplinary know-how of physicists, engineers, and technicians with the skills of our fine mechanics workshop to create innovative solutions for each application.



- ▶ Programmable high-power picosecond and nanosecond laser driver (PLS flex) – very compact laser source with PC control and fiber option.

Programmierbarer Hochleistungs-Pikosekunden- und Nanosekunden-Lasertreiber (PLS flex) – sehr kompakte Laserquelle mit PC-Ansteuerung und optionalem Faseranschluss.

When integrating laser modules, for example, the alignment 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 and the required optics or reflectors, comprehensive simulations are carried out. Temperature control is another important aspect of prototype development. 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.



- ▶ Compact projection system consisting of an FBH 561 nm laser module combined with a MEMS mirror for use in fast motion tracking and laser displays.

Kompaktes Projektionssystem, das ein 561 nm Lasermodul des FBH mit einem MEMS-Spiegel kombiniert. Es eignet sich sowohl zum Verfolgen schneller Bewegungen als auch für Laserdisplays.

Customized solutions for special applications

Our lab has fabricated complex UV LED-based irradiation systems for applications from plant growth lighting to antiseptics on human skin. Based on the application, the systems consist of up to 120 LEDs, precisely arranged and electronically controlled to ensure uniform irradiation and optimal thermal management. Great flexibility in the operation parameters allows prototype demonstration in different operational environments, such as green houses and health clinics.

A range of plug & play laser driver systems with intuitive GUI have been developed. They enable partners to conveniently test FBH's laser diodes and modules in their applications. To operate pulsed lasers, we have developed high-speed, high-current laser drivers based on GaN technology that achieve pulse lengths in the sub-nanosecond range. To run multiwavelength lasers or multiple lasers simultaneously, we have developed systems with ten individually programmable current sources (DC) in a single device and systems allowing fast alternating operation up to 1 kHz between two laser emission lines. The PLS flex, which is one such laser driver with a large operation range, was successfully utilized by the start-up Quantune Technologies GmbH. Using our programmable laser driver, they were able to determine the optimal operation parameters of the quantum cascade laser (QCL) employed in their low-cost miniaturized QCL spectrometer. Quantune Technologies was awarded the Innovationspreis Berlin Brandenburg in 2022.

- ▶ Portable SERDs system used for field measurements. Tragbares SERDs-System für Messungen vor Ort.

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.

Die hier entwickelten, hoch integrierten und zugleich einfach bedienbaren Systeme ermöglichen es unseren 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 Forschungsmodule 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. Die Prototypenentwicklung hat daher immer 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 feinmechanischen Werkstatt, um innovative Lösungen für die jeweilige Anwendung zu schaffen. 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 und die benötigten Optiken oder Reflektoren optimal zu positionieren, führen wir umfangreiche Simulationen durch. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von Prototypen ist die Temperaturkontrolle. Wir fertigen individuelle Lösungen mit aktiven oder passiven Kühlelementen, die thermisch optimal an die Forschungskomponenten gekoppelt werden. Um den Plug & Play-Betrieb zu gewährleisten, enthalten die Prototypen platzsparende Netzteile sowie Mikrocontroller, mit denen der Anwender die Betriebsparameter präzise steuern kann. 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

Unser Lab hat komplexe UV-LED-basierte Bestrahlungssysteme für verschiedene Anwendungen gefertigt – von der Beleuchtung für das Pflanzenwachstum bis zur Antiseptik auf menschlicher Haut. Die Systeme bestehen je nach Anwendung aus bis zu 120 LEDs, die präzise angeordnet und elektronisch gesteuert werden. Das gewährleistet eine gleichmäßige Bestrahlung und ein optimales Wärmemanagement. Die große Flexibilität bei den Betriebsparametern ermöglicht es, die Prototypen in verschiedenen Betriebsumgebungen wie Gewächshäusern oder Kliniken einzusetzen.

Zudem haben wir eine Reihe von Plug & Play-Lasertreibersystemen mit intuitiver Benutzeroberfläche entwickelt. Partner können damit die Laserdioden und -module des FBH bequem in ihren Anwendungen testen. Für den Betrieb von gepulsten Lasern wurden Galliumnitrid-basierte Hochgeschwindigkeits- und Hochstrom-Lasertreiber entwickelt, mit denen sich Pulslängen im Sub-Nanosekundenbereich erreichen lassen. Um Multiwellenlängen-Laser oder mehrere Laser gleichzeitig zu betreiben, haben wir Systeme mit zehn individuell programmierbaren Stromquellen (DC) in einem einzigen Gerät entwickelt. Hinzu kommen Systeme, die den schnellen Wechselbetrieb bis zu 1 kHz zwischen zwei Laseremissionslinien ermöglichen. Die PLS flex ist ein derartiger Lasertreiber mit großem Funktionsumfang, der von dem Start-up-Unternehmen Quantune Technologies GmbH erfolgreich eingesetzt wurde. Mithilfe unseres programmierbaren Lasertreibers konnten sie die optimalen Betriebsparameter eines Quantenkaskadenlasers (QCL) bestimmen, der in ihrem kostengünstigen miniaturisierten QCL-Spektrometer verwendet wird. Quantune Technologies wurde im Jahr 2022 mit dem Innovationspreis Berlin Brandenburg ausgezeichnet.

Our Vocational Training & Education Team



Skilled workers in high technology Fachkräfte in der Hochtechnologie sichern

How to attract bright minds for research and development in high technology? For more than 25 years, the Ferdinand-Braun-Institut has been promoting academic as well as vocational education and training.

We are closely connected with universities and actively engaged in academic teaching and training. Fourteen scientists of our institute currently teach at seven different universities and universities of applied sciences. Furthermore, they train the next generation of scientists by supervising their bachelor, master, and doctoral theses. There is also an intensive exchange of academic staff with postdocs and students, who conduct research both at FBH and at the respective partner university within the cooperation of currently nine Joint Labs.

In the field of vocational education and training, FBH offers four apprenticeships per year in microtechnology. In addition, we provide training in two further professions: industrial mechanic and IT specialist for system integration.

Kluge Köpfe für Forschung und Entwicklung in der Hochtechnologie gewinnen! Seit mehr als 25 Jahren kümmert sich das Ferdinand-Braun-Institut um die Fachkräftesicherung im akademischen Bereich sowie in der beruflichen Aus- 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 qualifizieren den wissenschaftlichen Nachwuchs zudem über Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen, die sie betreuen. Einen intensiven Austausch an akademischem Personal gibt es auch bei Postdocs und Studierenden, die im Rahmen der aktuell neun Joint Labs sowohl am FBH als auch an der jeweiligen Partnerhochschule forschen.

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

ANH Berlin – network for vocational and advanced training in high technology

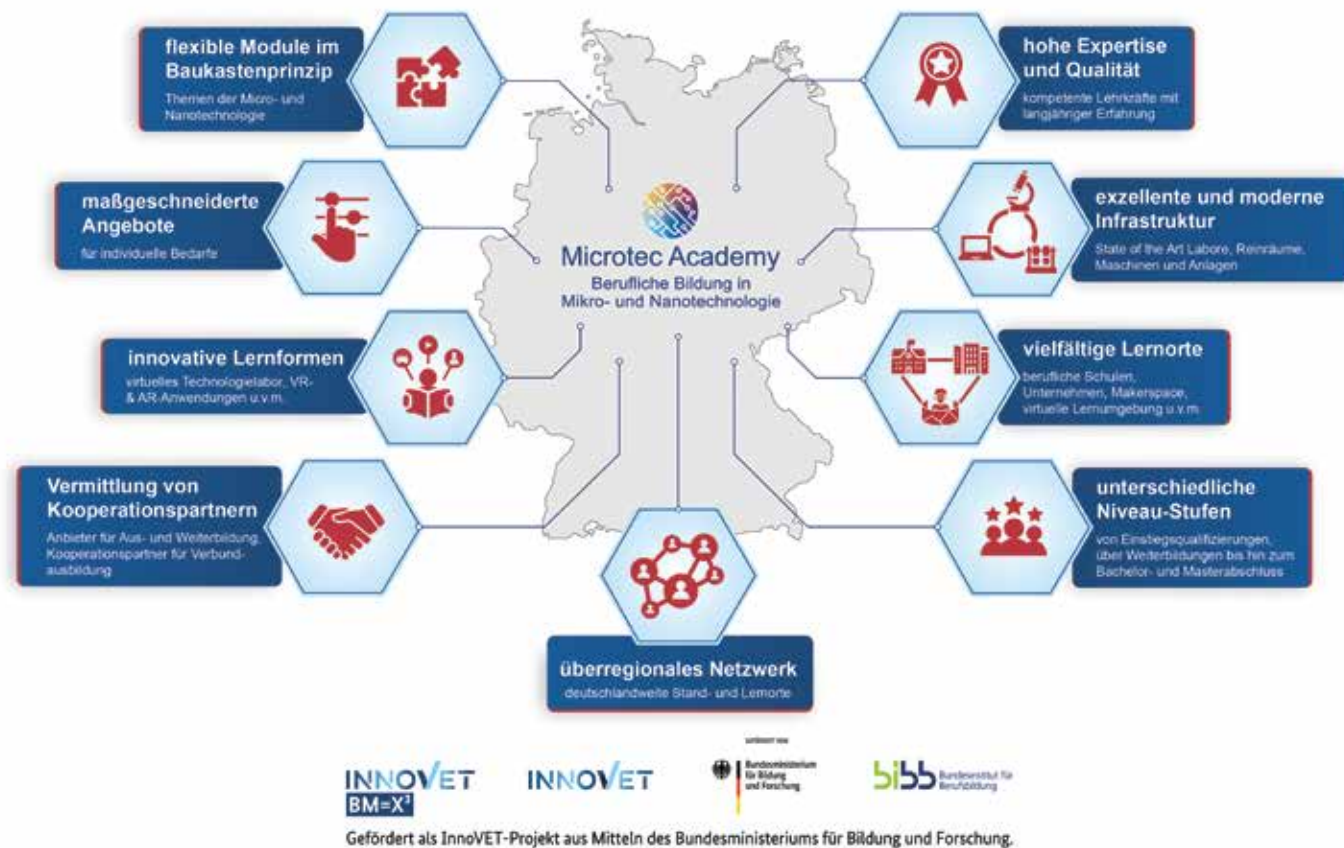
With ANH Berlin (Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie), founded at FBH in 2007, we have created a structure that strengthens vocational education and training far beyond the scope of the institute. At its core, the ANH Berlin team supports companies and research institutions in the high-tech sector to ensure their technical workforce. Motivating suitable young people to consider vocational training in this field remains a major challenge in this context. Still, many job profiles are scarcely known or even regarded as too 'cumbersome' or too 'demanding'. ANH Berlin makes technical occupations and promising career opportunities visible and gives young people an insight into real working conditions. Similar activities are addressing multipliers, such as teachers, vocational counselors, and parents. The network thus helps to bridge the gap between school and working life.

Tailored education and training in key technologies

Headed by ANH Berlin, eight project partners are shaping the Microtec Academy – a supra-regional vocational training academy tailored specifically to the highly diversified high-tech sector. Companies receive competent advice and customized offers for human resources development. On its digital learning platform, the Microtec Academy offers modules for different qualification and learning levels, which can be combined based on a modular system.

The newly developed virtual Technology Laboratory (VTL) is an important part of Microtec Academy, organized in a leading role by Hochschule Kaiserslautern. It simulates several tasks and work routines in the cleanroom and is suitable for training different target groups.

www.microtec-academy.de



Microtechnologist Erik Swarlik during the guided tour as part of the Ausbildungs-Allianz-Adlershof, explaining the work that takes place in our FBH cleanroom to interested high school students. Mikrotechnologe Erik Swarlik erklärt den interessierten Schülerinnen und Schülern bei der Führung im Rahmen der Ausbildungs-Allianz-Adlershof, welche Arbeiten im FBH-Reinraum stattfinden.

Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie – ANH Berlin

Mit dem 2007 am FBH gegründeten Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie (ANH Berlin) haben wir eine Struktur geschaffen, die die berufliche Bildung weit über das Institut hinaus stärkt. Im Kern unterstützt das Team von ANH Berlin Unternehmen und Forschungseinrichtungen bei der Sicherung des gewerblich-technischen Nachwuchses. 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 „trocken“ oder zu „anspruchsvoll“ eingeschätzt. ANH Berlin macht zukunftsweisende Berufe greifbar und ermöglicht Jugendlichen Einblick in reale Arbeitswelten – parallele Angebote richten sich an Multiplikator*innen wie Lehrkräfte, Berufsberater*innen und Eltern. Das Netzwerk schlägt die wichtige Brücke am Übergang von der Schule ins Berufsleben.

Passgenaue Aus- und Weiterbildung in Schlüsseltechnologien

Unter Leitung von ANH Berlin konzipieren acht Verbundpartner die Microtec Academy – eine überregionale Berufsbildungsakademie, die speziell auf den stark diversifizierten Hochtechnologiebereich zugeschnitten ist. Unternehmen werden kompetent beraten und erhalten maßgeschneiderte Angebote für die Personalentwicklung. Auf ihrer digitalen Lernplattform bietet die Microtec Academy Module für unterschiedliche Qualifikationsstufen und Lernniveaus, die nach einem Baukastensystem zusammengestellt werden können.

Ein wichtiger Baustein der Microtec Academy, ist das virtuelle Technologielabor (VTL), das im Verbundteam federführend von der Hochschule Kaiserslautern konzipiert und realisiert wird. Das VTL veranschaulicht und simuliert verschiedene Arbeitsschritte im Reinraum und kann von unterschiedlichen Zielgruppen in der Aus-, Fort- und Weiterbildung genutzt werden.

www.microtec-academy.de



How to attract young people to STEM – main events in 2022

Ausbildungs-Allianz-Adlershof

At the open day, organized by the Science and Technology Park Adlershof, about 120 pupils had the chance to get to know several high-tech companies and institutes, including the FBH. In small groups of up to 15 young people, they got first-hand information about training opportunities and working conditions. They got to know employees and apprentices reporting about their own professional background as well as how to get started in the high-tech field. Another eleven companies replied to questions about jobs and career prospects at the accompanying exhibition.

Girls' Technology Congress

The congress organized by ANH was fully booked rather quickly and was met with great enthusiasm. One chemistry teacher from a Berlin school summarized it like that: "I would like to thank you very much for organizing such a fantastic event. I took part

with 14 girls from my school and they were all very excited." All in all, 120 girls had the chance to spend a day in the role of a scientist, IT-specialist, or lab assistant.

The congress started with introducing several role models talking about their careers in STEM, followed by a magic chemistry show and a job orientation fair. After that, the girls participated in two-hour workshops and experienced science and technology first hand by trying it out for themselves.

- ➔ Soldering workshop organized by the ABB Ausbildungszentrum Berlin as part of the Girls' Technology Congress 2022. Lötworkshop des ABB Ausbildungszentrums Berlin im Rahmen des Mädchen-Technik-Kongresses 2022.



- ➔ Many photos were taken during the opening program of the 2022 Girls' Technology Congress as souvenirs and for social media. Beim Auftaktprogramm des Mädchen-Technik-Kongresses 2022 wurden viele Fotos als Erinnerung und für Social Media gemacht.



Nachwuchs für MINT begeistern – Veranstaltungs-Highlights 2022

Ausbildungs-Allianz-Adlershof

Rund 120 Schülerinnen und Schüler ab der 9. Klasse lernten bei der Ausbildungs-Allianz-Adlershof im Juni Ausbildungsbetriebe und Berufsfelder der Hightech-Branche im Wissenschafts- und Technologiepark kennen. Sie warfen einen Blick hinter die Kulissen von Hightech-Unternehmen und Forschungseinrichtungen am Standort Adlershof. In kleinen Gruppen von maximal 15 Personen besuchten die Jugendlichen je zwei Einrichtungen vor Ort – darunter auch das Ferdinand-Braun-Institut. Mitarbeitende und Azubis berichteten über ihren Arbeitsalltag und typische Tätigkeiten, welche Anforderungen bei ihren Berufen gefragt sind und welche Ausbildungsberufe ihr Unternehmen anbietet. Den Interessierten gaben sie Tipps, wie der Einstieg in die Hightech-Branche am besten gelingt. Weitere Fragen beantworteten die elf ausstellenden Partner an ihren Ständen auf der begleitenden Ausbildungsmesse.

Mädchen-Technik-Kongress

Auch der von ANH organisierte Mädchen-Technik-Kongress im September war schnell ausgebucht und stieß auf begeisterte Resonanz. Die Fachleiterin Chemie vom Berliner Humboldt-Gymnasium fasste es so zusammen: „Ich möchte mich hiermit noch einmal herzlich bei Ihnen bedanken für die Organisation des großartigen Mädchen Technik Kongresses 2022. Ich habe mit insgesamt 14 Mädchen meiner Schule teilgenommen und alle waren durchweg begeistert.“ Insgesamt schlüpfen 120 Mädchen für einen Tag in die Rolle einer Forscherin, Programmiererin oder Laborantin.

Die Veranstaltung startete mit einer gemeinsamen Einführung, in der Role Models ihre Erfahrungen aus ihren MINT-Berufen teilten. Weiter ging es mit Zauber-Chemie-Show und Berufsorientierungs-Messe. Anschließend experimentierten die Mädchen in zweistündigen Workshops und konnten so Naturwissenschaft und Technik praktisch erleben und selbst ausprobieren.

Our Administration & Science Supporting Teams



Highlights Schlaglichter

Successfully evaluated

Leibniz institutes are evaluated every seven years at the latest by independent experts. This procedure assesses whether the funding requirements (supraregional importance and national scientific interest) continue to be met. In December 2021, the Ferdinand-Braun-Institut was audited by an international commission.

The evaluation report, which has been available since July 2022, emphasizes not only the outstanding research, but also the institute's "excellent results in technology transfer" – evidenced by an "impressively high number of patents", spin-offs, the close cooperation with industrial companies and, last but not least, the exceptionally high share of industrial and public third-party funding. The state-of-the-art infrastructure in the two clean-rooms is also highlighted. The reviewers also expressed their appreciation for FBH's future-oriented approach: The additional entry into quantum technology was "a very good strategic decision".

» *The additional entry into quantum technology was "a very good strategic decision".*

» *Der zusätzliche Einstieg in die Quantentechnologie war „eine sehr gute strategische Entscheidung.“*

Erfolgreich evaluiert

Leibniz-Institute werden spätestens nach sieben Jahren von unabhängigen Sachverständigen evaluiert. In diesem Verfahren wird geprüft, ob die Fördervoraussetzungen (überregionale Bedeutung und gesamtstaatliches wissenschaftspolitisches Interesse) weiterhin gegeben sind. Das Ferdinand-Braun-Institut wurde im Dezember 2021 turnusgemäß von einer internationalen Kommission geprüft.

Der seit Juli 2022 vorliegende Evaluierungsbericht betont nicht nur die hervorragende Forschung, sondern auch die „ausgezeichneten Ergebnisse des Instituts beim Technologietransfer“ – belegt durch eine „beindruckend hohe Anzahl von Patenten“, Ausgründungen, die engen Kooperationen mit Industrieunternehmen und nicht zuletzt den außergewöhnlich hohen Anteil an industriellen und öffentlichen Drittmitteln. Hervorgehoben wird auch die Infrastruktur auf dem neuesten technologischen Stand in den zwei Reinräumen. Auch im Hinblick auf die zukunftsorientierte Ausrichtung des FBH fanden die Gutachter lobende Worte: Der zusätzliche Einstieg in die Quantentechnologie war „eine sehr gute strategische Entscheidung.“

FMD topics in focus – Green ICT & quantum and neuromorphic computing

In 2022, the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) has continued to grow. As the largest cross-site R&D alliance for micro- and nanoelectronics in Europe, the FMD offers a unique range of competencies and infrastructure. FBH is one of 13 partner institutes with a total of more than 4,500 employees, contributing its know-how and bridging the gap between basic and application-oriented research.

Two BMBF-funded large-scale projects started in 2022, in which FBH is also involved: Green ICT @ FMD and FMD-QNC. An integral part of these two projects is a nationwide **microelectronics academy**, which aims to establish modern training programs in the field of microelectronics and nanoelectronics. These efforts are intended to train and secure skilled personnel in the high-tech sector, a field of great importance for Germany. Further activities initiated by our institute to secure skilled staff are presented on p. 19.

As part of **Green ICT**, a cross-site competence center for resource-conscious information and communications technology (ICT) is being established. This center focuses on eco-balancing ICT solutions and provides suitable measurement environments

for partners in industry and science. FBH is involved with the topics of digitization, mm-wave transceivers, and 140 GHz links and coordinates one of the three technical focal points, the hub "energy-saving communication infrastructures".

FMD-QNC addresses fast quantum (Q) and neuromorphic computing (NC), which set the stage for novel computing technologies. Computationally intensive technologies and applications, such as artificial intelligence, are increasingly pushing classical digital computers to their performance limits. The FMD-QNC project is funding equipment to provide the manufacturing processes needed for quantum computing components. At FBH, this includes investments in photolithography and opto-electronic hetero-integration.

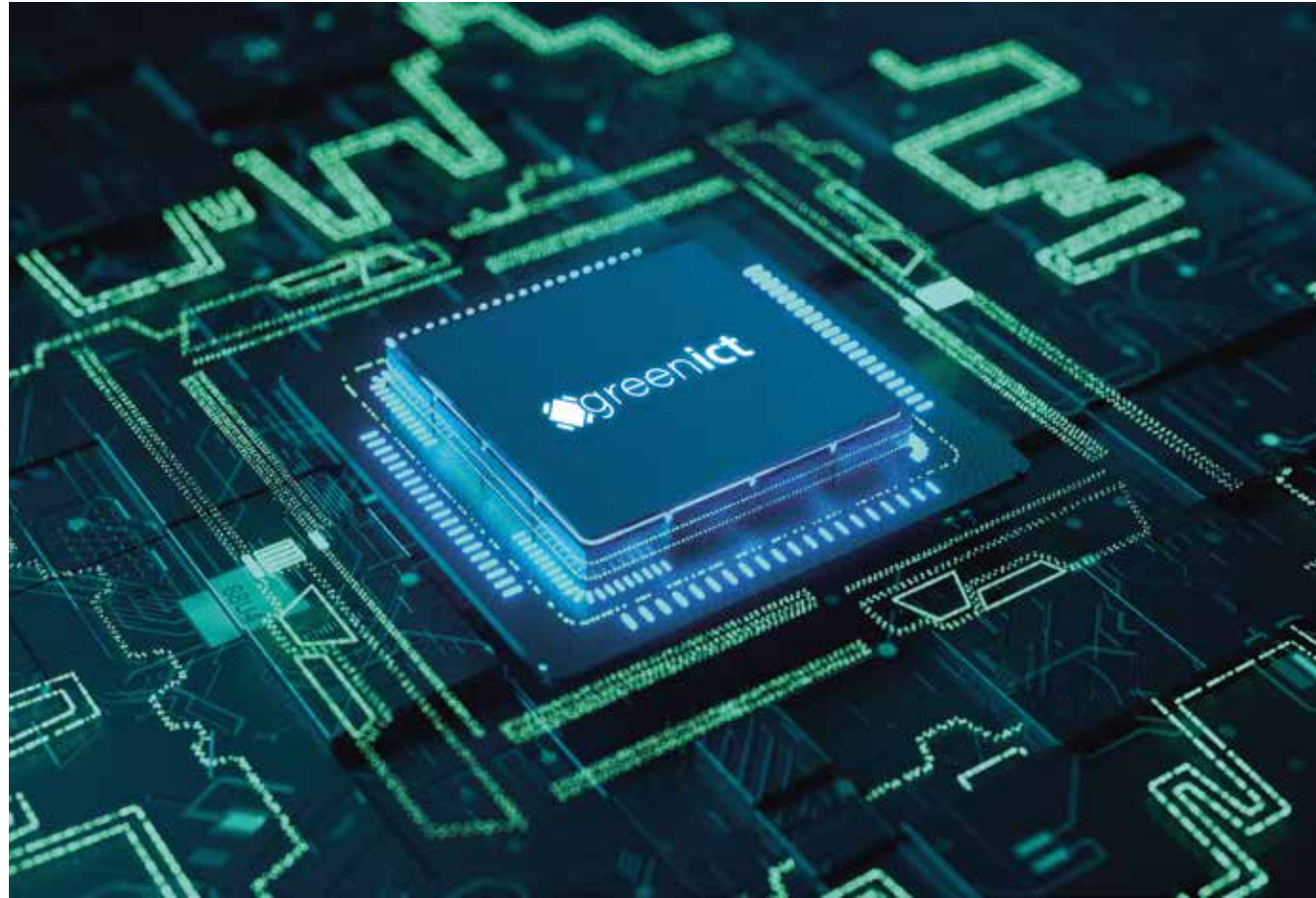


Digital switching power transistors are core components for modern mobile communications



(5G/6G) and for resource-efficient green ICT solutions. Power transistors have a significant impact on overall efficiency in such applications, for example in base stations for wireless communication. The head of the Digital PA Lab, Andreas Wentzel (2nd from right), realizes energy-efficient transmitter architectures with a cross-departmental team, aiming at full digitalization.

Digital schaltende Leistungstransistoren sind zentrale Komponenten für die moderne mobile Kommunikation (5G/6G) und für ressourcenschonende Green-ICT-Anwendungen. Bei derartigen Applikationen haben Leistungstransistoren einen erheblichen Einfluss auf die Gesamteffizienz, beispielsweise in Mobilfunk-Basisstationen. Der Leiter des Digital PA Lab, Andreas Wentzel (2. von rechts), realisiert mit einem abteilungsübergreifenden Team energieeffiziente Sender-Architekturen, die auf eine vollständige Digitalisierung zielen.



FMD-Themen im Focus – Green ICT & Quanten- und neuromorphes Computing

Im Jahr 2022 ist die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) weiter gewachsen. Als größter standortübergreifender F&E-Zusammenschluss für die Mikro- und Nanoelektronik in Europa bietet die FMD eine einzigartige Kompetenz- und Infrastrukturvielfalt. Das FBH ist eines der 13 Partnerinstitute mit insgesamt mehr als 4.500 Mitarbeiter*innen, das sein Know-how einbringt und die Brücke zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung schlägt.

Zwei BMBF-geförderte Großprojekte sind 2022 gestartet, an denen auch das FBH beteiligt ist: Green ICT @ FMD und FMD-QNC. Bestandteil dieser beiden Vorhaben ist auch eine deutschlandweite **Mikroelektronik-Akademie**, die moderne Ausbildungsangebote im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik schafft. Damit sollen Fachkräfte in diesem für Deutschland so wichtigen Hightech-Bereich ausgebildet und gesichert werden. Weitere Aktivitäten, die unser Institut zur Fachkräftesicherung initiiert hat, stellen wir auf S. 19 vor.

Im Rahmen von **Green ICT** entsteht ein standortübergreifendes Kompetenzzentrum für eine ressourcenbewusste Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Dieses Zentrum arbeitet an der Öko-Bilanzierung von IKT-Lösungen und stellt geeignete Mess-Umgebungen für Partner in Wirtschaft und Wissenschaft bereit. Das FBH ist mit den Themen Digitalisierung, mm-Wellen-Transceiver und 140 GHz-Links beteiligt und koordiniert einen der drei fachlichen Schwerpunkte, den Hub „Energiesparende Kommunikationsinfrastrukturen“.

FMD-QNC adressiert schnelles Quanten- (Q) und neuromorphes Computing (NC), die die Voraussetzungen für neuartige Rechentechnologien schaffen. Rechenintensive Technologien und Anwendungen, wie etwa die künstliche Intelligenz, bringen klassische Digitalrechner zunehmend an ihre Leistungsgrenzen. Im Vorhaben FMD-QNC wird Equipment finanziert, um die Herstellungsverfahren bereitstellen zu können, die für Quanten-Computing-Komponenten benötigt werden. Am FBH umfasst dies Investitionen zur Fotolithografie und optoelektronischen Heterointegration.

Industry-ready solutions for quantum technologies

The R&D activities in the Integrated Quantum Technology research area at Ferdinand-Braun-Institut aim at transferring proof-of-concept demonstrators of quantum technology from the laboratory to industrially usable solutions. The addressed applications include quantum sensing, quantum communication, and quantum computing. To this end, we cooperate with Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin) within the framework of four Joint Labs, thus bridging the gap between basic and application-oriented research.

Two of these labs focus on **atom-based quantum technologies and quantum sensing**. Within the framework of the first Joint Lab, we have been developing narrowband and ultra-narrowband diode laser modules, spectroscopy, and distribution modules, in particular for use in space since 2008. These modules have proven their capability several times in practical use. Another Joint Lab is developing the next generation of chip-scale quantum sensors based on high-precision spectroscopy of atomic or molecular ensembles. These will be used to measure physical quantities with the highest precision. The resulting instruments exploit the intrinsic properties of quantum mechanical states that are precisely manipulated using laser light.

The other two Joint Labs are focused on **integrated photonic devices for quantum communications and information processing** using precise control of light. Specifically, the labs are exploring novel concepts for solid-state-based quantum emitters suitable for photonic integration. These include, for example, color centers in diamond or silicon carbide. Scientists are fabricating nano- and microstructures that guide, trap, and manipulate light at the nanoscale and microscale. These color centers can be created using ion bombardment. The goal is to achieve controllable light-matter interaction, for example, to efficiently couple quantum memories in diamond to individual light particles (photons). These, in turn, are to be efficiently coupled into optical fibers. In the long term, compact on-chip modules for quantum communication and computing shall be developed.

Further information on current R&D activities and results in this research area can be found starting on p. 74.

- 📌 **FBH has a unique technology for micro-integration of lasers and photonic components into robust and complex modules for space applications and quantum technologies.**
 Das FBH verfügt über eine einzigartige Technologie zur Mikrointegration von Lasern und photonischen Komponenten zu robusten und komplexen Modulen für Weltraum-anwendungen und Quantentechnologien.





Novel concepts to guide, capture, and manipulate light.

In our Joint Lab Diamond Nanophotonics, which is led by Tim Schröder (small image), scientists from FBH and HU Berlin are jointly developing such sawfish-like structures. The real devices are 1,000 times thinner than a human hair and integrated into diamond chips. They host color defects that are used as quantum bits (qubits) and can be coupled via single particles of lights (i.e. photons). The aim is to build efficient on-chip interfaces between the stationary qubits and the propagating photons, which are the key components for the development of next-generation quantum-photonic networks.

In unserem Joint Lab Diamond Nanophotonics, das von Tim Schröder (kleines Bild) geleitet wird, entwickeln Wissenschaftler*innen des FBH und der HU Berlin gemeinsam solche sägefischartigen Strukturen. In Wirklichkeit sind diese Bauelemente 1.000-mal dünner als ein menschliches Haar und in Diamantchips integriert. Sie enthalten Farbdefekte, die als Quantenbits (Qubits) dienen und über einzelne Lichtteilchen (Photonen) gekoppelt werden können. Ziel ist es, effiziente On-Chip-Schnittstellen zwischen stationären Qubits und sich ausbreitenden Photonen herzustellen – den Schlüsselkomponenten beim Aufbau von quantenphotonischen Netzwerken der nächsten Generation.



Quantum technology know-how in operation

We use our extensive know-how and many years of experience in the field of laser metrology and quantum technologies in various R&D projects with partners such as the German Aerospace Center (DLR), the European Space Agency (ESA), and the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA). The developments aim, among other things, at optical atomic clocks with the highest stability and accuracy, which open up applications on Earth and in space. These range from investigations of fundamental physics questions to modern navigation and satellite communication. Our scientists are working, for example, on an optical rubidium frequency reference based on a two-photon transition, which will be demonstrated in an optical clock on a small satellite – paving the way for routine use in future satellite navigation systems.

Highly stable laser system for quantum information processing (CaLas)

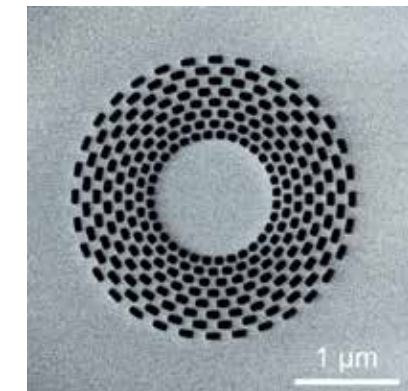
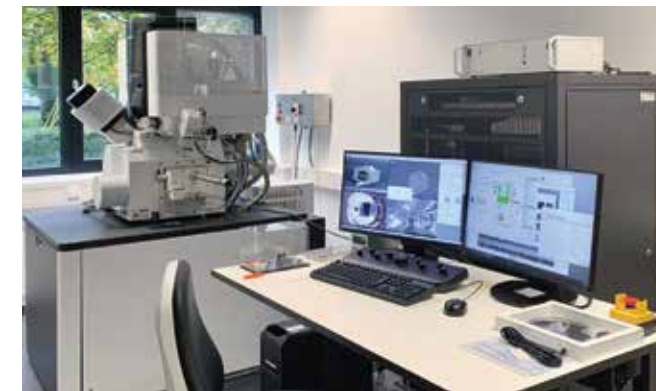
A system of ultracold stored ions is one of the most promising platforms for quantum information technology. Ion traps are currently considered one of the most controllable quantum systems ever. They are suitable for quantum computing, quantum simulation, and for building quantum networks because the stored information can be encoded and sent using laser light. Among other things, this should significantly increase the computing power of computers and make communication tap-proof. Such applications require compact and maintenance-free laser systems that cool the ions and are needed to perform quantum mechanical operations. Until now, such systems have only been available on a laboratory scale. To pave the way for the broad use of quantum computers or simulators, we are developing one of the core components of such systems at FBH: narrow-band (<100kHz) and high-power laser modules (several 100 mW) at various wavelengths. To assemble the equally robust and highly complex laser modules, which at the same time score

with compact dimensions and low weight, we use our worldwide unique hybrid integration technology. These laser modules are the basis for a compact, reliable, and automated laser system to be operated with calcium ions in quantum information technology. Thus, a completely rack-mounted ion trap quantum computer becomes conceivable.

Even more quantum technology – customized laser diodes & epitaxial layers

At the heart of FBH's laser modules are laser diodes, which our Optoelectronics Department develops and manufactures with customized properties in cooperation with our colleagues from Materials and Process Technology. For quantum technology applications, for example, the laser wavelength for each atom is tailored exactly to the atomic transition to be excited. To this end, we often use master laser diodes with precisely adjusted wavelengths and particularly narrow linewidths together with semiconductor amplifiers. The particular challenge for the amplifiers is to maximize output power while maintaining excellent lifetime.

FBH's expertise starts with the material. For an industry partner, we are currently developing epitaxial layers for VCSELs. These are laser diodes whose resonators are aligned vertically and which emit light from the surface. This enables compact and lightweight structures, as required for space applications. VCSELs at 796 nm are expected to be used in future space-qualified quantum sensors and help improve global data communication. The sensors are a key technology because they enable to align satellites with each other with utmost precision and thus provide high-speed data connectivity. Space-qualified VCSELs with tailored wavelengths developed at FBH provide the prerequisite for this.



- High-performance focused ion beam system for device characterization and rapid prototyping of photonic components. The integrated SEM can be used to visually inspect devices – here: bull's eye resonator in silicon nitride patterned with the focused ion beam.

Leistungsstarkes fokussiertes Ionenstrahlssystem für die Charakterisierung von Bauelementen und das Rapid Prototyping von photonischen Komponenten. Mit dem integrierten SEM können Bauteile visuell geprüft werden – hier: Bull's Eye Resonator in Siliziumnitrid, der mit dem fokussierten Ionenstrahl strukturiert wurde.

Industrietaugliche Lösungen für Quantentechnologien

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. Zu den adressierten Anwendungen zählen die Quantensensorik, die Quantenkommunikation und das Quanten-Computing. 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. Ein weiteres Joint Lab entwickelt die nächste Generation von Quantensensoren im Chipmaßstab, die auf der hochpräzisen Spektroskopie atomarer oder molekularer Ensembles beruhen.

📌 The development of our devices starts in FBH's epitaxy laboratories.

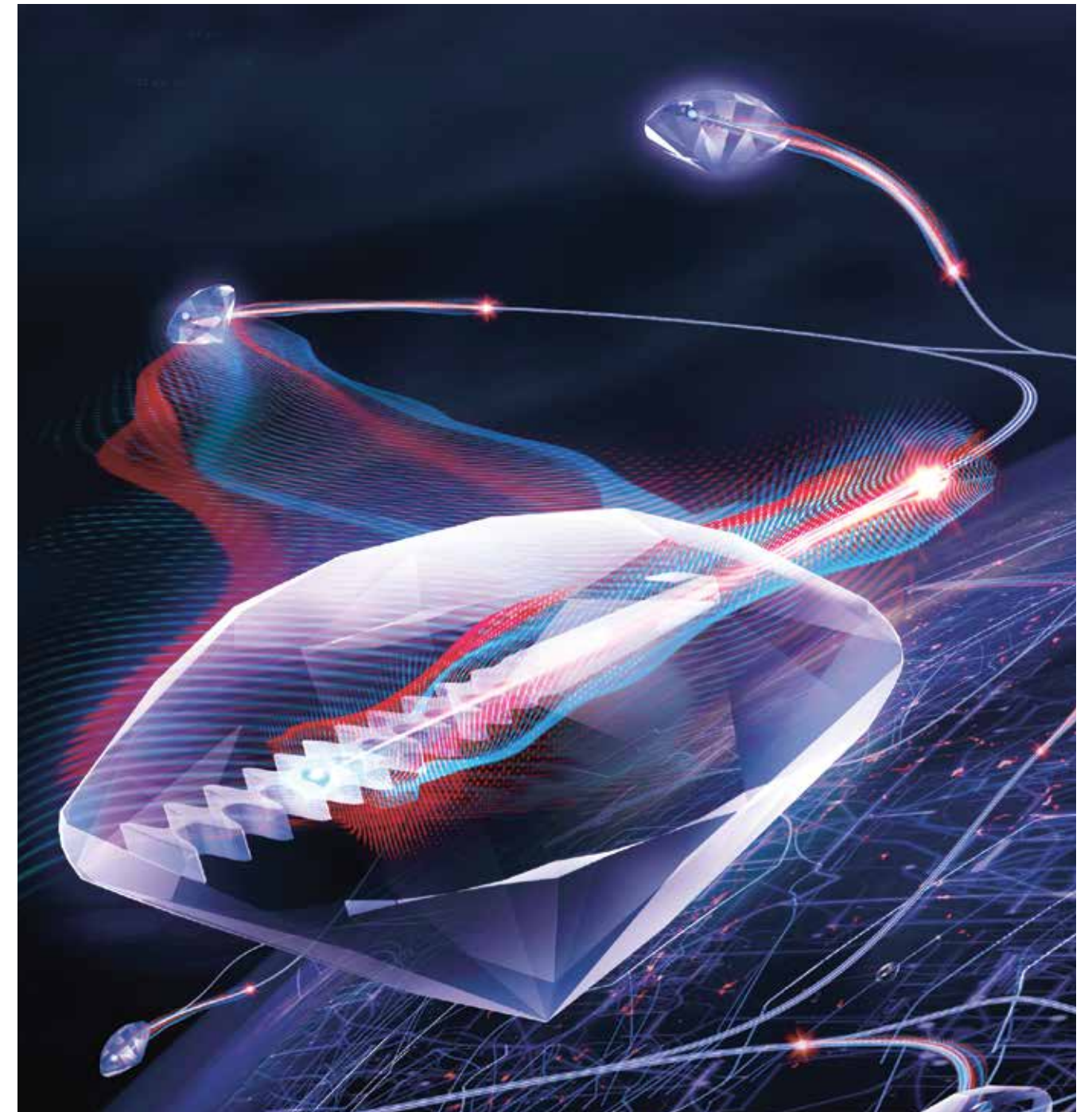
In den Epitaxielaboren des FBH startet die Entwicklung unserer Bauelemente.



Damit sollen physikalische Größen mit höchster Präzision vermessen werden. Die entstehenden Geräte nutzen die intrinsischen Eigenschaften quantenmechanischer Zustände, die mithilfe von Laserlicht präzise manipuliert werden.

Die beiden anderen Joint Labs beschäftigen sich mit **integrierten photonischen Bauelementen für die Quantenkommunikation und -informationsverarbeitung** und nutzen die präzise Kontrolle von Licht. Die Labs erforschen neuartige Konzepte für festkörperbasierte Quantenemitter, die sich für eine 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. Diese Farbzentren lassen sich durch Ionenbeschuss erzeugen. Ziel ist es, eine kontrollierbare Licht-Materie-Wechselwirkung zu erreichen, um beispielsweise Quantenspeicher in Diamant effizient an einzelne Lichtteilchen (Photonen) zu koppeln. Diese sollen wiederum effizient in Lichtleitfasern eingekoppelt werden. Langfristig sollen kompakte On-Chip-Module für Quantenkommunikation und -computing entwickelt werden.

Weitere Informationen zu aktuellen F&E-Aktivitäten und Ergebnissen in diesem Forschungsbereich finden sich ab S. 74.



📌 Schematic representation of defect centers in diamond nanostructures. They can be used as quantum bits. Via quantum operations (entanglement), quantum information can be stored in emitted single photons and transmitted in optical fibers over the future quantum internet.

Schematische Darstellung von Defektzentren in Diamant-Nanostrukturen. Sie können als Quantenbits genutzt werden. Über Quantenoperationen (Verschränkung) kann die Quanteninformation in emittierten einzelnen Photonen gespeichert und in Glasfasern im zukünftigen Quanteninternet übertragen werden.

(© HU Berlin/AG Integrierte Quantenphotonik)

➔ FBH develops high-precision laser modules that can be used in atomic clocks – such as in the European satellite navigation system Galileo.

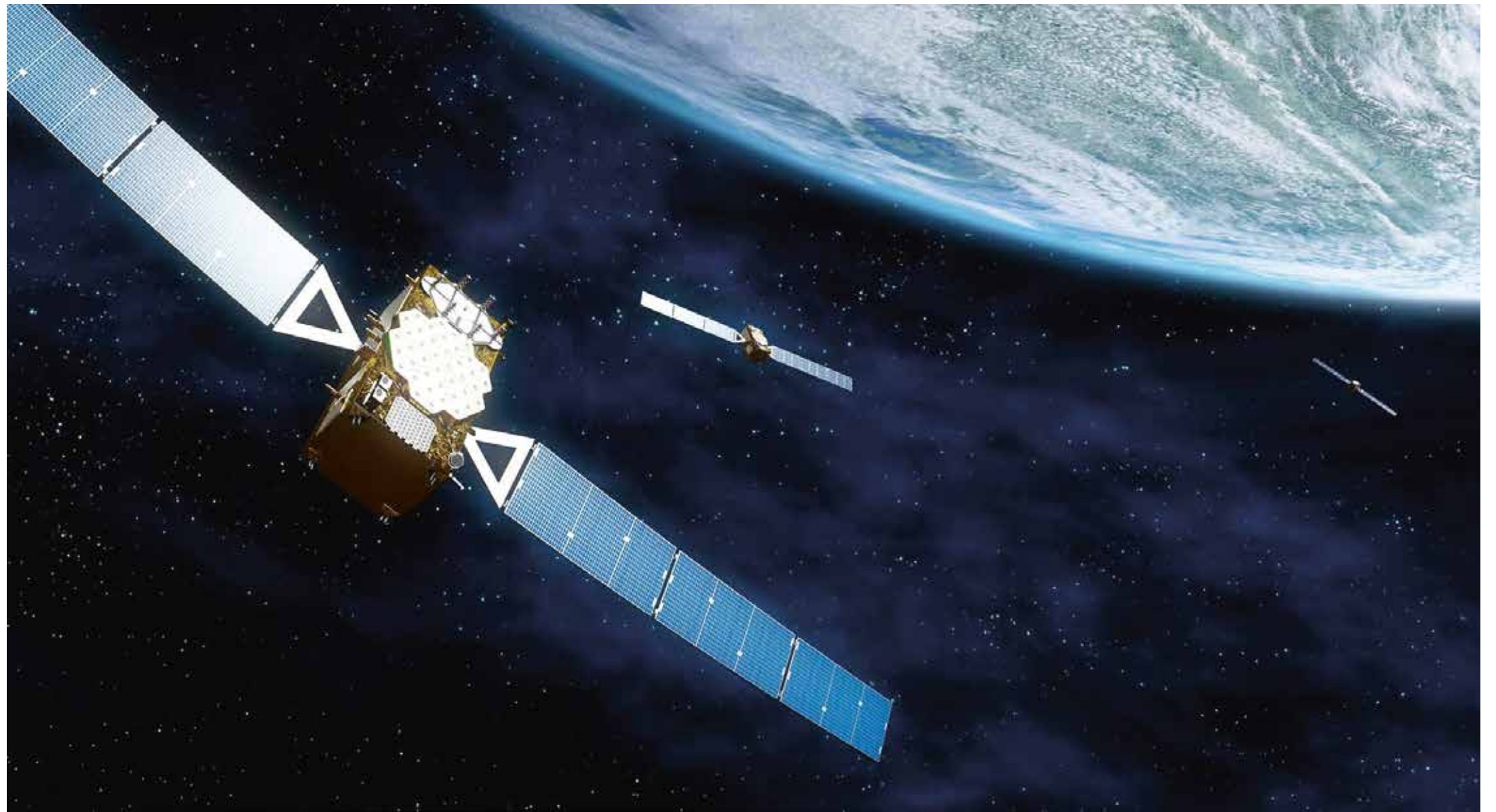
Das FBH entwickelt hochpräzise Lasermodule, die in Atomuhren eingesetzt werden können – wie etwa im europäischen Satelliten-Navigationssystem Galileo.
(© DLR, CC BY-NC-ND 3.0)

Quantentechnologisches Know-how im Einsatz

Unser umfassendes Know-how und die langjährigen Erfahrungen im Bereich der Lasermetrologie und Quantentechnologien nutzen wir in verschiedenen F&E-Projekten mit Partnern wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der europäischen Weltraumorganisation (ESA) und der amerikanischen Raumfahrtagentur (NASA). Die Entwicklungen zielen unter anderem auf optische Atomuhren mit höchster Stabilität und Genauigkeit, die Anwendungen auf der Erde und im Weltraum eröffnen. Diese reichen von der Untersuchung fundamentalphysikalischer Fragestellungen bis hin zu moderner Navigation und Satellitenkommunikation. Unsere Wissenschaftler*innen arbeiten beispielsweise an einer optischen Rubidium-Frequenzreferenz auf Basis eines Zwei-Photonen-Übergangs, die in einer optischen Uhr auf einem Kleinsatelliten demonstriert werden soll – um so einem routinemäßigen Einsatz etwa in zukünftigen Satelliten-Navigationssystemen den Weg zu ebnet.

Hochstabiles Lasersystem für die Quanten- Informationsverarbeitung (CaLas)

Ein System aus ultrakalten gespeicherten Ionen ist eine der vielversprechendsten Plattformen für die Quanten-Informationstechnologie. Ionenfallen zählen derzeit zu den am besten kontrollierbaren Quantensystemen überhaupt. Sie eignen sich für das Quantenrechnen, die Quantensimulation und zum Aufbau von Quantennetzwerken, da die gespeicherte Information in Laserlicht kodiert und versendet werden kann. Damit sollen unter anderem die Rechenleistungen von Computern signifikant steigen und die Kommunikation abhörsicher werden. Derartige Anwendungen erfordern kompakte und wartungsfreie Lasersysteme, die die Ionen kühlen und die zum Durchführen quantenmechanischer Operationen benötigt werden. Bislang konnten solche Systeme nur im Labormaßstab eingesetzt werden. Um dem breiten Einsatz von Quantencomputern oder -simulatoren den Weg zu ebnet, entwickeln wir am FBH eine der zentralen Komponenten derartiger Systeme: schmalbandige (< 100 kHz) und leistungsstarke Lasermodule (mehrere 100 mW) mit verschiedenen Wellenlängen. Für den Aufbau der ebenso robusten wie hochkomplexen Lasermodule, die zugleich mit kompakten Abmessungen und geringem Gewicht punkten, nutzen wir unsere weltweit einmalige hybride Integrationstechnologie.



Diese Lasermodule sind die Basis für ein kompaktes, zuverlässiges und automatisiertes Lasersystem für den Betrieb mit Kalzium-Ionen in der Quanten-Informationstechnologie. Damit wird ein komplett in ein Rack montierter Ionenfallen-Quantencomputer denkbar.

Noch mehr Quantentechnologie – maßgeschneiderte Laserdioden & Epitaxieschichten

Herzstücke der FBH-Lasermodule sind Laserdioden, die unser Department Optoelektronik zusammen mit den Kolleg*innen aus der Material- und Prozesstechnologie mit maßgeschneiderten Eigenschaften entwickelt und fertigt. Für die Quantentechnologie beispielsweise wird die Laserwellenlänge für jedes Atom exakt auf den jeweiligen anzuregenden Atomübergang zugeschnitten. Dabei setzen wir oft Master-Laserdioden mit präzise eingestellter Wellenlänge und besonders schmaler Linienbreite zusammen mit Halbleiterverstärkern

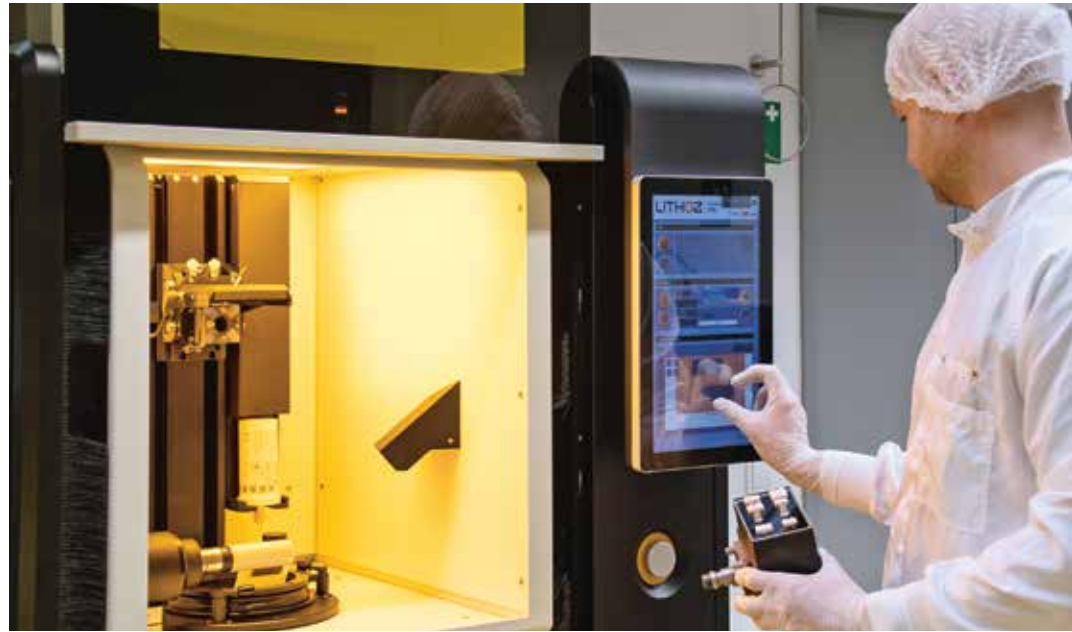
ein. Die besondere Herausforderung für die Verstärker ist die maximierte Ausgangsleistung bei gleichzeitig ausgezeichneter Lebensdauer.

Die FBH-Expertise setzt bereits beim Material an. So entwickeln wir derzeit für einen Industriepartner Epitaxieschichten für VCSEL. Das sind Laserdioden, deren Resonatoren vertikal ausgerichtet sind und die Licht von der Oberfläche abstrahlen. Dies ermöglicht kompakte und leichte Aufbauten wie sie für Weltraumanwendungen benötigt werden. VCSEL bei 796 nm sollen künftig in weltraumtauglichen Quantensensoren eingesetzt werden und dabei helfen, die weltweite Datenkommunikation zu verbessern. Die Sensoren sind eine Schlüsseltechnologie, da sie eine hochgenaue Ausrichtung von Satelliten untereinander und damit eine Hochgeschwindigkeitsverbindung für Daten ermöglicht. Die Voraussetzung dafür liefern die weltraumtauglichen VCSEL mit maßgeschneiderter Wellenlänge, die wir am FBH entwickeln.



➔ The CaLas laser module is the centerpiece of a compact, reliable, and automated laser system for operation with calcium ions in quantum information technology. Das CaLas-Lasermodul ist das Herzstück eines kompakten, zuverlässigen und automatisierten Lasersystems für den Betrieb mit Kalzium-Ionen in der Quanten-Informationstechnologie.

Additive manufacturing: enables sophisticated micro- and nanostructures up to prototypes



With the help of this lithography-based 3D ceramic printer, we can fabricate complex ceramic components with high precision at FBH. These are to be used in integrated quantum sensors, for example for miniaturized frequency references.

Mithilfe dieses Lithografie-basierten 3D-Keramikdruckers können wir am FBH komplexe keramische Komponenten mit hoher Präzision fertigen. Diese sollen in integrierten Quantensensoren eingesetzt werden, beispielsweise für miniaturisierte Frequenzreferenzen.

In recent years, we have significantly expanded our capabilities in additive manufacturing by putting several high-performance 3D printing machines into operation. In addition to a wide variety of plastics, our systems also print metal and ceramics three-dimensionally. Additive manufacturing enables us to realize components with complex geometries that are not feasible with conventional processes. This supports us in rapid prototyping of test geometries and designs, which we can quickly verify in experimental setups. Easy handling and reproducibility make it straightforward to fabricate small-scale series. Spare parts or fiber-reinforced high-performance components can also be produced quickly and cost-effectively.

Our scientists use the equipment to develop and manufacture components and functional assemblies up to functionalized microbanks for optical subsystems. These will later be used in quantum sensors and communications, and especially in space. The thermal, mechanical, electrical, and magnetic material properties of ceramics, for example, are particularly promising in the development of compact and robust payload components for integrated quantum technologies. The new approach of lithography-based ceramic manufacturing (LCM) enables in-

novative high-performance solutions, especially in the areas of miniaturized vacuum cells and optical systems for atomic-optical sensors and optical frequency references. Therefore, we have started technology development to subsequently qualify these technologies to meet the requirements of quantum applications. Among other things, a first optical frequency reference with additively manufactured ceramic components will then be realized.

Additive processes can be used to produce micro- and nanostructures quickly and flexibly in research workflows. These include waveguides, antennas, and gratings to couple and decouple light. Our scientists use focused electrons to locally deposit material in a direct writing process. This process is very similar to conventional 3D printing, but enables complex geometries with structures much smaller than the wavelength of visible light. The process does not require masks or lithographic processing. Material can also be removed locally using focused ions through physical sputtering. This allows us to both examine existing micro components (cross-section preparation) and optimize them by polishing or shape adjustments. In the future, we plan to process optical components first conventionally with electron beam lithography and then rework and optimize them.



Developments for high-power direct diode laser systems.



In the Samba project, colleagues from various technology departments are joining forces with scientists from the High-Power Diode Lasers Lab headed by Paul Crump (front row, center – holding the process head of the system) to develop a kilowatt-class direct diode laser system. They are working closely with colleagues from FBH's Prototype Engineering Lab to integrate the research modules into a portable, autonomous unit. The extremely compact high-power laser system will then be integrated into a maneuverable robotic arm and used in additive manufacturing. Among other things, the robot will be used to produce customized side panels for high-speed trains with significantly reduced weight.

Im Projekt Samba entwickeln die Kolleg*innen verschiedenster Technologieabteilungen mit den Wissenschaftler*innen des High-Power Diode Lasers Labs rund um Paul Crump (vorne, Mitte – mit dem Prozesskopf des Systems) ein Direkt-Diodenlasersystem der Kilowatt-Klasse. Sie arbeiten eng mit den Kolleg*innen des FBH-Entwicklungszentrums zusammen, um die Forschungsmodule in ein tragbares, autonomes Gerät zu integrieren. Das überaus kompakte Hochleistungs-Lasersystem wird anschließend in einen beweglichen Roboterarm integriert und in der additiven Fertigung eingesetzt. Damit sollen dann u. a. maßgeschneiderte Seitenwände von Hochgeschwindigkeitszügen mit deutlich reduziertem Gewicht hergestellt werden.

Additive Fertigung: ermöglicht ausgefeilte Mikro- und Nanostrukturen bis hin zu Prototypen



Workpieces from the new 3D metal printer for research and prototyping, including a holder for a soldering fixture and water distributors to cool a high-performance pump laser module. Werkstücke aus dem neuen 3D-Metalldrucker für Forschungsbetrieb und Prototypenbau, darunter ein Halter für eine Lötvorrichtung und Wasserverteiler, die ein Hochleistungs-Pumplasermodul kühlen.

In den letzten Jahren haben wir unsere Möglichkeiten bei der additiven Fertigung mit mehreren leistungsstarken 3D-Druckmaschinen deutlich ausgebaut. Neben den verschiedensten Kunststoffen drucken unsere Anlagen auch Metall und Keramik dreidimensional. Die additive Fertigung ermöglicht es uns, Komponenten mit komplexen Geometrien zu realisieren, die mit klassischen Prozessen nicht umsetzbar sind. Dies unterstützt uns beim Rapid Prototyping von Testgeometrien und Designs, die wir rasch in experimentellen Aufbauten verifizieren können. Dank der einfachen Handhabung und Reproduzierbarkeit lassen sich damit unkompliziert Kleinserien fertigen. Auch Ersatzteile oder faserverstärkte Hochleistungskomponenten können kostengünstig und schnell hergestellt werden.

Unsere Wissenschaftler*innen nutzen die Anlagen, um Bauelemente und funktionale Baugruppen bis hin zu funktionali-

sierten Mikrobänken für optische Subsysteme zu entwickeln und zu fertigen. Diese sollen später in Quantensensorik und -kommunikation sowie insbesondere im Weltraum eingesetzt werden. So sind die thermischen, mechanischen, elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften von Keramiken besonders vielversprechend für kompakte und robuste Nutzlastkomponenten der integrierten Quantentechnologien. Der neue Ansatz der lithografischen additiven Fertigung von Hochleistungskeramiken (LCM) ermöglicht innovative Lösungen, insbesondere in den Bereichen miniaturisierter Vakuumzellen und Optiksyste-me für Atom-optische Sensoren sowie optische Frequenzreferenzen. Daher haben wir mit der Technologieentwicklung begonnen, um diese später für die Anforderungen der Quantentechnologien zu qualifizieren. Unter anderem soll dann eine erste optische Frequenzreferenz mit additiv gefertigten Keramikkomponenten realisiert werden.

Mit additiven Prozessen lassen sich im Forschungsbetrieb Mikro- und Nanostrukturen schnell und flexibel fertigen. Dazu zählen etwa Wellenleiter, Antennen oder Gitter zum Ein- und Auskoppeln von Licht. Unsere Wissenschaftler*innen nutzen fokussierte Elektronen, um Material in einem direkten Schreibprozess lokal abzuschneiden. Dieser Prozess ist dem konventionellen 3D-Druck sehr ähnlich, ermöglicht aber komplexe Geometrien, deren Strukturen wesentlich kleiner sind als die Wellenlänge von sichtbarem Licht. Der Prozess erfordert weder Masken noch lithografische Prozessierung. Material kann zudem lokal mithilfe von fokussierten Ionen durch physikalisches Sputtern entfernt werden. Damit können wir bestehende Mikrokomponenten sowohl untersuchen (Querschnittspräparation) als auch durch Polieren oder Formanpassungen optimieren. Künftig sollen optische Komponenten zunächst herkömmlich mit Elektronenstrahl-Lithografie prozessiert und anschließend bearbeitet und optimiert werden.

More red! Closing the gap in laser wavelengths

The FBH develops laser diodes in the wavelength range from 620 nm–1180 nm with excellent performance parameters. Until now, only the wavelength range between 690 nm and 730 nm could not be covered, where laser diodes are needed for future applications in atomic clocks and quantum technologies. We were able to close this gap at the Ferdinand-Braun-Institut by an optimized growth process in which we suppress a possible phase separation. To generate the laser emission, we use thin quantum trenches of GaInAsP. On this basis, we were able to demonstrate DBR lasers with wavelengths around 700 nm for the first time. They deliver 50...60 mW at 150 mA with a side mode suppression > 30 dB.



Red-emitting diode laser on c-mount. Rot emittierender Diodenlaser auf C-Mount.

Mehr Rot! Lücke bei Laserwellenlängen geschlossen

Das FBH entwickelt Laserdioden im Wellenlängenbereich von 620 nm–1180 nm mit exzellenten Leistungsparametern. Bisher konnte lediglich der Wellenlängenbereich zwischen 690 nm und 730 nm nicht abgedeckt werden, in dem Laserdioden für zukünftige Anwendungen im Bereich der Atomuhren und Quantentechnologien benötigt werden. Diese Lücke konnten wir am Ferdinand-Braun-Institut durch einen optimierten Wachstumsprozess schließen, bei dem wir eine mögliche Phasenseparation unterdrücken. Um die Laseremission zu erzeugen, verwenden wir dünne Quantengraben aus GaInAsP. Auf dieser Basis konnten wir erstmalig DBR-Laser mit Wellenlängen um 700 nm demonstrieren. Sie liefern 50...60 mW bei 150 mA mit einer Seitenmodenunterdrückung > 30 dB.

High-power diode lasers – key components for modern laser systems

High-power diode lasers are crucial parts in modern laser systems, such as those used in automotive manufacturing for metal cutting and welding. According to Optech Consulting, the market for laser materials processing alone reached a new record volume of \$21 billion in 2021 – with a projected annual growth of ~10%*. We develop the corresponding light sources for such systems in the wavelength range between 620 and 1180 nm and cooperate with the leading manufacturers. Diode lasers from FBH pump solid-state, fiber, and gas lasers of industrial partners with high repetition rates and are increasingly used directly. They are also a key technology for novel applications, ranging from laser surgery and the assembly of complex shapes in additive manufacturing to lasers for high-energy laser research and laser fusion.

Our scientists are constantly optimizing the output power and efficiency of the diode lasers. A single emitter currently delivers up to 68 W output power with 69 % efficiency. We are currently expanding our portfolio from pulsed to continuous wave operation. By piling up our diode lasers to stacks, we can scale the output power of a module up to the kilowatt range. It is also possible to focus the laser beam by means of lenses and fiber coupling. Moreover, we use our pump modules as a technology platform for integrating lasers that emit at wavelengths around 1600 nm.



Hochleistungs-Diodenlaser – Schlüsselkomponenten für moderne Lasersysteme

Hochleistungs-Diodenlaser sind unverzichtbare Komponenten für moderne Lasersysteme, etwa in der Automobilfertigung beim Schneiden und Schweißen von Metallen. Laut Optech Consulting erreichte alleine der Markt für Laser-Materialbearbeitung im Jahr 2021 mit 21 Milliarden Dollar ein neues Rekordvolumen – mit einem prognostizierten jährlichen Wachstum von ~10%*. Für derartige Systeme entwickeln wir die passenden Lichtquellen im Wellenlängenbereich zwischen 620 bis 1180 nm und kooperieren mit den führenden Herstellern. Diodenlaser aus dem FBH pumpen Festkörper-, Faser- oder Gaslaser industrieller Partner mit hohen Wiederholraten und werden immer öfter auch direkt eingesetzt. Sie sind zudem eine Schlüsseltechnologie für neuartige Anwendungen. Diese reichen von der Laserchirurgie, der Montage komplexer Formen in der additiven Fertigung bis hin zu Lasern für die Hochenergie-Laserforschung und Laserfusion.

Unsere Wissenschaftler*innen optimieren dazu permanent die Ausgangsleistung und Effizienz der Diodenlaser. So liefert ein einzelner Emitter derzeit bis zu 68 W Ausgangsleistung mit 69 % Effizienz. Aktuell erweitern wir unser Portfolio vom Puls- in den Dauerstrichbetrieb. Unsere Diodenlaser stapeln wir zu Stacks und können so die Ausgangsleistung eines Moduls bis in den Kilowatt-Bereich skalieren. Auch die gezielte Bündelung des Laserstrahls mittels Linsen und Faserkopplung ist möglich. Unsere Pumpmodule nutzen wir zugleich als Technologieplattform für die Integration von Lasern, die bei Wellenlängen um 1600 nm emittieren.

*Optech Consulting, in Laser Focus World, 2022 Summary Report

- **Full value chain in-house: from device design to laser chips to high-performance laser modules and systems.**
 Die komplette Wertschöpfungskette im eigenen Haus: vom Bauelemente-Design über Laserchips bis hin zu Hochleistungs-Lasermodule und -systemen.

Determining the reliability of lasers & LEDs with great precision



- **At these new measurement workstations, laser diodes with different wavelengths and optical powers as well as in different design variants can be investigated.**
 An diesen neuen Messplätzen lassen sich Laserdioden mit verschiedener Wellenlänge und optischer Leistung sowie in unterschiedlichen Aufbauvarianten untersuchen.

In order to demonstrate the reliability of our gallium arsenide- and gallium nitride-based laser diodes and LEDs, we have significantly expanded our measurement infrastructure. With 168 additional slots, we have doubled the capacity to determine the lifetime of laser diodes experimentally – an aspect that is becoming increasingly important not only in industrial contracts but also in research projects. With this infrastructure, we can perform experiments on a statistically relevant scale and with longer operating times. As a result, the lifetime of the devices can be determined or predicted even more accurately than before.

Laser diodes can thus be investigated at seven new measurement workstations in various design variants and housings: on c-mounts, CCPs with different lengths, screening submounts, and in various TO housings. They can be operated at varying power levels up to a laser current of 15 amperes, and in some measurement chambers with two different currents per diode. Fully automatic operation and intermediate measurements of power-voltage-current characteristics are also possible thanks to the software custom-developed at FBH.

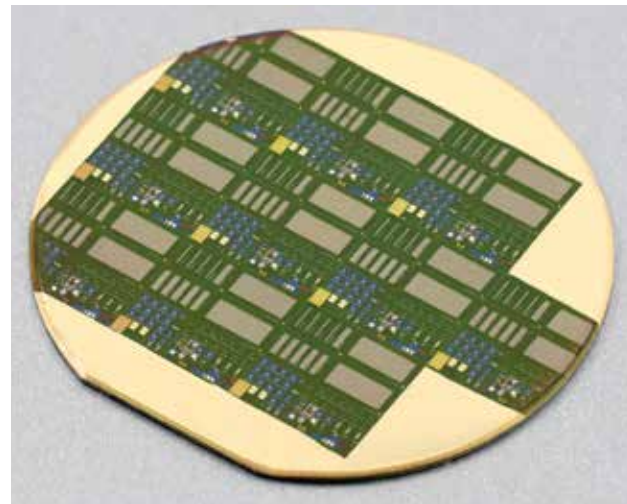
Zuverlässigkeit von Lasern & LEDs präzise bestimmen

Um die Zuverlässigkeit der von uns entwickelten Galliumarsenid- und Galliumnitrid-basierten Laserdioden und LEDs zu demonstrieren, haben wir unsere Messplatz-Infrastruktur deutlich ausgebaut. Mit 168 zusätzlichen Plätzen haben wir die Kapazitäten verdoppelt, um experimentell die Lebensdauer von Laserdioden zu bestimmen – ein Aspekt, der nicht nur bei industriellen Aufträgen, sondern auch in Forschungsprojekten immer wichtiger wird. Mit dieser Infrastruktur können wir Experimente in statistisch relevanter Größenordnung und mit längeren Laufzeiten durchführen. Dadurch lässt sich die Lebensdauer der Bauelemente noch exakter als bislang bestimmen oder vorhersagen.

So lassen sich Laserdioden an sieben neuen Messplätzen in verschiedenen Aufbauvarianten und Gehäusen untersuchen: auf C-Mounts, CCPs in verschiedenen Längen, Screening Submounts und in diversen TO-Gehäusen. Sie können in verschiedenen Leistungsklassen bis zu einem Laserstrom von 15 Ampere sowie in einigen Messkammern mit zwei verschiedenen Strömen je Diode betrieben werden. Der vollautomatische Betrieb und Zwischenmessungen von Leistung-Spannung-Strom-Kennlinien ist dank der am FBH speziell entwickelten Software ebenfalls möglich.

AlN-on-AlN transistors – for mobile communications

Due to increasing requirements, for example in mobile communications, we are advancing our established GaN technology into an AlN-based transistor technology. This allows dispersion phenomena to be reduced in both mm-wave and power electronic transistors, since the compensation doping required for GaN buffer layers is no longer necessary. Meanwhile, we have measured functional AlN transistors on 1" AlN substrates. Compared to analog AlN transistors on SiC substrates, the devices exhibit significantly reduced hysteresis effects. Further details can be found on p. 94.



Transistor structures on an 1" AlN wafer.
Transistorstrukturen auf einem 1" AlN-Wafer.

hige AlN-Transistoren auf 1" AlN-Substraten vermessen. Im Vergleich zu analogen AlN-Transistoren auf SiC-Substraten weisen die Bauelemente signifikant reduzierte Hystereseeffekte auf. Weitere Details gibt es auf S. 94.

AlN-auf-AlN-Transistoren – für die mobile Kommunikation

Die Anforderungen, etwa in der mobilen Kommunikation, steigen. Daher entwickeln wir die etablierte GaN-Technologie zu einer AlN-basierten Transistortechnologie weiter. Damit lassen sich sowohl bei mm-Wellen- als auch bei leistungselektronischen Transistoren Dispersionserscheinungen reduzieren, da die Kompensationsdotierung entfällt, die für GaN-Pufferschichten benötigt wird. Inzwischen haben wir funktionsfähige



Digitization of processes at FBH.



The three-person programming team led by Til Bartel (2nd row, center) and numerous supporting colleagues from the technical departments have already digitized more than half of FBH's cleanroom processes. Since the go-live, process data now also flow automatically into our Manufacturing Execution System (MES). We use the MES to ensure the reproducible quality of our wafer processes and thus create the basis for transferring research results into production technologies suitable for industrial use. In parallel, we continuously optimize the functionalities of the MES to meet our requirements.

Digitalisierung am FBH: Das dreiköpfige Programmierer-Team um Til Bartel (2. Reihe, Mitte) sowie zahlreichen Mitarbeiter*innen aus den Fachabteilungen haben bereits mehr als die Hälfte der Reinraumprozesse am FBH digitalisiert. Seit dem Go-Live fließen nun auch Prozessdaten automatisiert in unser Manufacturing Execution System (MES) ein. Mit dem MES, dessen Funktionalitäten wir permanent auf unsere Erfordernisse optimieren, sichern wir die reproduzierbare Qualität unserer Waferprozesse und schaffen so die Voraussetzungen, um Forschungsergebnisse in industrietaugliche Fertigungstechnologien zu transferieren.

Gallium oxide FinFETs for future power electronic applications

With its wide bandgap and expected high breakdown strength, the semiconductor material gallium oxide ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) is highly attractive for use in future power electronic systems. In particular, a vertical device structure is advantageous because it requires less chip area at high voltages and increases reliability, among other benefits. In our Wide-Bandgap Electronics Department, functional vertical gallium oxide FinFETs have now been fabricated for the first time. The average breakdown field strength realized in the drift zone is 2.7 MV/cm, thus about twice as high

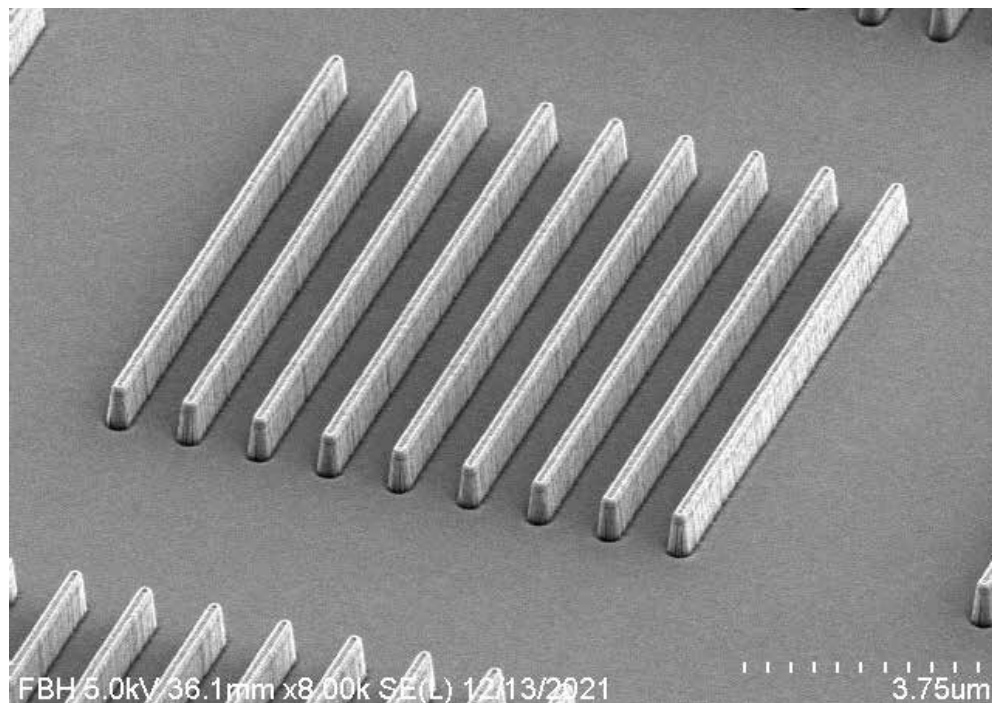
as for GaN-based transistors. This represents a decisive step towards vertical gallium oxide transistors in the 1200V class. Further details can be found on p. 96.

» This represents a decisive step towards vertical gallium oxide transistors in the 1200V class.

Galliumoxid-FinFETs für künftige leistungselektronische Anwendungen

Das Halbleitermaterial Galliumoxid ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) ist dank seines hohen Bandabstands und der zu erwartenden hohen Durchbruchfestigkeit für den Einsatz in künftigen leistungselektronischen Systemen hochattraktiv. Insbesondere ein vertikaler

Aufbau der Bauelemente ist vorteilhaft, da unter anderem weniger Chipfläche bei hohen Spannungen benötigt wird und die Zuverlässigkeit steigt. In unserem Wide-Bandgap Electronics Department wurden nun erstmals funktionsfähige vertikale Galliumoxid-FinFETs hergestellt. Die in der Driftzone realisierte mittlere Durchbruchfeldstärke ist mit 2,7MV/cm etwa doppelt so hoch wie für GaN-basierte Transistoren. Damit ist ein entscheidender Schritt hin zu vertikalen Galliumoxid-Transistoren der 1200 V-Klasse gelungen. Weitere Details finden sich auf S. 96.



» Ga_2O_3 fins of a gallium oxide FinFet.
 Ga_2O_3 -Finnen eines Galliumoxid-FinFETs.

Securing skilled workers in the industrial-technical sector – breaking new ground!



» Helping to shape future technologies – with training in microtechnology!
 Zukunftstechnologien mitgestalten – mit einer Ausbildung in der Mikrotechnologie!

We have been involved in securing skilled personnel for many years – both in academic and industrial/technical training. Every year we train microtechnologists as important specialists for cleanroom operations. These activities are strongly supported by the ANH Berlin training network based at our institute (see p. 19). We promote career opportunities in the high-tech sector – including at job fairs and directly in schools – to encourage more school leavers to explore careers in this field and to see vocational training as an equivalent alternative to university studies. However, finding qualified skilled workers and inspiring suitable young people to take up vocational training remains a challenge.

An essential gap in laboratory operations could be filled by lateral entrants. For example, an **electronics production specialist** could

be trained for certain tasks in the cleanroom or in measurement laboratories within a shortened training period. To test this format, our Process Technology Department is offering a pilot internship. In parallel, ANH Berlin is developing needs-based further training courses to provide specialists with qualifications to meet future requirements – buzzword digitization – of a constantly evolving labor market.

The **European Chips Act** also offers promising approaches. By investing in technological infrastructure and expanding manufacturing capacities, Europe aims to strengthen its technological sovereignty, competitiveness, and resilience in semiconductor manufacturing in the long term. The strategic goals also address the shortage of skilled workers and the acquisition of new talents.

Fachkräfte im gewerblich-technischen Bereich sichern – neue Wege gehen!

Seit vielen Jahren engagieren wir uns in der Fachkräftesicherung – sowohl in der akademischen als auch der gewerblich-technischen Ausbildung. Jedes Jahr bilden wir Mikrotechnolog*innen als wichtige Fachkräfte für den Reinraumbetrieb aus. Diese Aktivitäten werden von dem am Institut angesiedelten Ausbildungsnetzwerk ANH Berlin (vgl. S.19) stark unterstützt. Wir bewerben die Karrierechancen im Hightech-Bereich – unter anderem auf Messen und direkt in den Schulen –, damit mehr Schulabgänger*innen Berufe in diesem Bereich kennenlernen und in der beruflichen Bildung eine gleichwertige Alternative zum Studium sehen. Qualifizierte Fachkräfte zu finden oder geeignete junge Menschen für eine Ausbildung zu begeistern, bleibt jedoch eine Herausforderung.

Eine wichtige Lücke im Laborbetrieb könnten Quereinsteiger*innen schließen. So könnte etwa eine **Fachkraft Elektronikfertigung** für bestimmte Aufgaben im Reinraum oder in Messlaboren in einer verkürzten Ausbildungszeit angelernt werden. Um dieses Format zu erproben, bietet unsere Abteilung Prozesstechnologie ein Pilotpraktikum an. Parallel entwickelt ANH Berlin bedarfsgerechte Weiterbildungsangebote, um Fachkräften Qualifikationen für die zukünftige Anforderungen eines sich stetig weiterentwickelnden Arbeitsmarktes – Stichwort Digitalisierung – zu vermitteln.

Auch der auf europäischer Ebene angeschobene **Chips Act** bietet gute Ansätze. Mit Investitionen in die technologische Infrastruktur und Ausbau der Fertigungskapazitäten will Europa seine technologische Souveränität, Wettbewerbsfähigkeit und Widerstandsfähigkeit bei der Halbleiterfertigung langfristig stärken. Die strategischen Ziele adressieren auch den Fachkräftemangel und die Gewinnung neuer Talente.



ANH Berlin uses videos to provide insights into various career profiles in order to inspire young people to consider an apprenticeship. Mit Videos gibt ANH Berlin Einblicke in verschiedene Berufsbilder, um junge Menschen für eine Ausbildung zu begeistern.



Pushing UV technologies forward – Advanced UV for Life!



Program Chair Neysha Lobo Ploch (FBH) during her talk at ICULTA 2023. Program Chair Neysha Lobo Ploch (FBH) bei ihrem Talk auf der ICULTA 2023.

For nine years, the Advanced UV for Life consortium, coordinated by FBH, provided the framework for the development and use of UV semiconductors. The partners covered the entire value chain – from technology development, devices and system integration to the application and marketing of UV LED light sources. By founding the association of the same name in July 2022, the currently 35 partners from industry and the scientific community continue their successful cooperation.

The association offers its members a competent network for professional exchange and regularly informs about current research developments and market trends. It also ensures that UV LED topics are not only perceived in expert communities and the business sector but also remain visible in politics and the public.

ICULTA – conference with international appeal

Together with the Ferdinand-Braun-Institut, Advanced UV for Life e.V. organized the “International Conference on UV LED Technologies & Applications – ICULTA 2023”. In April 2023, the conference offered the UV LED community an international forum to exchange ideas and results for the third time. More than 220 participants from 27 countries presented and discussed current developments. Topics of the conference were broad and covered the complete value chain from UV LED technology to systems and applications in areas such as medicine, UV curing, monitoring of UV systems, plant growth, and sensor technology. Presentations included promising results showing how far-UVC LEDs can effectively combat multi-drug resistant pathogens such as MRSA and be used to treat chronic, non-healing wounds.

FBH was well integrated into the conference not only in terms of organization but also with regard to content. The head of the Prototype Engineering Lab at FBH, Neysha Lobo Ploch, was Program Chair. Other active members of the Program Committee were Michael Kneissl from the Joint Lab GaN Optoelectronics, the head of Materials Technology Markus Weyers, and Klaus Jacobs, co-initiator of the Advanced UV for Life Association.

» FBH was well integrated into the conference not only in terms of organization but also with regard to content.

UV-Technologien voranbringen – Advanced UV for Life!

Neun Jahre lang bot das vom FBH federführend organisierte Konsortium Advanced UV for Life den Rahmen für die Entwicklung und den Einsatz von UV-Halbleitern entlang der kompletten Wertschöpfungskette – von Technologieentwicklung, Bauelementen und Systemintegration bis hin zur Anwendung und Vermarktung von UV-LED-Lichtquellen. Mit der Gründung des gleichnamigen Vereins im Juli 2022 führen die aktuell 35 Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft die bewährte Zusammenarbeit fort.

Der Verein bietet seinen Mitgliedern ein kompetentes Netzwerk zum fachlichen Austausch und informiert regelmäßig über aktuelle Forschungsentwicklungen und Markttrends. Er sorgt zudem dafür, dass UV-LED-Themen nicht nur in Fachkreisen und der Wirtschaft wahrgenommen werden, sondern auch in Politik und Öffentlichkeit sichtbar bleiben.

ICULTA – Konferenz mit internationaler Strahlkraft

Gemeinsam mit dem Ferdinand-Braun-Institut organisierte der Advanced UV for Life e.V. die „International Conference on UV LED Technologies & Applications – ICULTA 2023“. Im

April 2023 bot die Konferenz der UV-LED-Gemeinschaft bereits zum dritten Mal ein internationales Forum zum Austausch von Ideen und Ergebnissen. Mehr als 220 Teilnehmer*innen aus 27 Ländern präsentierten und diskutierten aktuelle Entwicklungen. Thematisch war die Konferenz breit aufgestellt und umfasste die komplette Wertschöpfungskette von der UV-LED-Technologie bis zu Systemen und Anwendungen in Bereichen wie Medizin, UV-Härtung, Überwachung von UV-Systemen, Pflanzenwachstum und Sensorik. Präsentiert wurden unter anderem vielversprechende Ergebnisse, die zeigen wie Fern-UVC-LEDs multiresistente Krankheitserreger wie MRSA effektiv bekämpfen und zur Behandlung chronischer, nicht heilender Wunden eingesetzt werden können.

Nicht nur organisatorisch, sondern auch inhaltlich war das FBH gut in die Konferenz eingebunden. Die Leiterin des Entwicklungszentrums für Prototypen am FBH, Neysha Lobo Ploch, war Program Chair. Im Programm-Komitee waren zudem Michael Kneissl aus dem Joint Lab GaN Optoelectronics, der Leiter der Materialtechnologie Markus Weyers und Klaus Jacobs, Mitinitiator des Advanced UV for Life Vereins, aktiv.



UV LEDs and a medical irradiation system were on display at FBH's info booth during the exhibition accompanying ICULTA 2023.

UV-LEDs und ein medizinisches Bestrahlungssystem waren am FBH-Infostand auf der begleitenden Ausstellung der ICULTA 2023 zu sehen.



Portable, spectrometer-free resonance Raman system for on-site measurements on selected substances.

Mobil einsetzbares, spektrometerloses Resonanz-Raman-System für Vor-Ort-Messungen an ausgewählten Substanzen.

What to expect after coal? Prospects for the future through microsensors & digitalization!

The energy transition is a major challenge for regions like Lusatia, whose economic power and jobs are closely linked to coal production. For the structural change to succeed, perspectives are needed that open up a future after lignite. For this reason, the BMBF has been funding the Innovation Campus Electronics and Microsensors (iCampus Cottbus) since 2019 to advance technologies in microsensors and digitization as well as to establish the region as an innovation hub.

Within the framework of iCampus, FBH has since been setting up the μ -Spectrum application laboratory. Among other things, the institute is working on a spectrometer-free resonance Raman system that will eliminate the need for complex and costly spectrometers in the future. The measurement system will initially be used on carotenoids, which play a role in both plants and medicine – the range of detectable substances is to be expanded later. Another project we are involved in is the development of a mobile radar system enabling cardiovascular monitoring for home use. We are developing indium phosphide circuits for this purpose, which shall then be used in terahertz sensor technology in a further step.

Giving Lusatia a further boost

FBH has been cooperating with BTU Cottbus-Senftenberg for many years, among other things within the framework of a Joint Lab in the field of high frequency and microwave technology. In iCampus we have further consolidated these activities. Since December 2022, our institute has also been involved as one of the ten founding members of the **Lausitz Science Network**. The alliance of research institutions aims to promote young scientists, invite them to conferences, and attract specialists – last but not least, to raise awareness of Lusatia being a science and research region. "With our application-oriented research and technical developments, we will continue to make an active contribution to ensuring that the economic transformation in the region succeeds," explained Scientific Managing Director Günther Tränkle on the occasion of the association's founding. The BTU Cottbus-Senftenberg is a central partner and technology driver for the regional economy.

Was kommt nach der Kohle? Zukunftschancen durch Mikrosensorik & Digitalisierung!

Die Energiewende ist für Regionen wie die Lausitz, deren Wirtschaftskraft und Arbeitsplätze eng mit der Kohleförderung verbunden sind, eine große Herausforderung. Damit der Strukturwandel gelingt, sind Perspektiven gefragt, die eine Zukunft nach der Braunkohle eröffnen. Daher fördert das BMBF seit 2019 den Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik (iCampus Cottbus), um Technologien in Mikrosensorik und Digitalisierung voranzutreiben und die Region als Innovationsstandort zu etablieren.

Im Rahmen von iCampus baut das FBH seither das Applikationslabor μ -Spektrum auf und arbeitet unter anderem an einem spektrometerlosen Resonanz-Raman-System, mit dem künftig komplexe und aufwändige Spektrometer entfallen können. Das Messsystem wird zunächst bei Carotinoiden eingesetzt, die sowohl in Pflanzen als auch in der Medizin eine Rolle spielen – die nachweisbaren Substanzen sollen später erweitert werden. Beteiligt sind wir auch an der Entwicklung eines mobilen Radarsystems zum Herzkreislauf-Monitoring für den Heimbereich. Wir entwickeln dafür Indiumphosphid-Schaltungen, die in einem weiteren Schritt für die Terahertz-Sensorik eingesetzt werden sollen.

Weitere Impulse für die Lausitz

Das FBH kooperiert seit vielen Jahren mit der BTU Cottbus-Senftenberg, unter anderem im Rahmen eines gemeinsamen Joint Labs im Bereich Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik. In iCampus haben wir diese Aktivitäten weiter verstetigt. Seit Dezember 2022 engagiert sich unser Institut zudem als eines der zehn Gründungsmitglieder des **Lausitz Science Networks**. Die Allianz aus Forschungseinrichtungen will den Nachwuchs fördern, zu Tagungen einladen und Fachkräfte gewinnen – und nicht zuletzt den Wissenschaftsstandort Lausitz bekannter machen. „Mit unserer anwendungsorientierten Forschung und unseren technischen Entwicklungen werden wir weiter aktiv dazu beitragen, dass die wirtschaftliche Transformation in der Region gelingt“, erklärte der wissenschaftliche Geschäftsführer Günther Tränkle anlässlich der Vereinsgründung. Die BTU Cottbus-Senftenberg sei ein zentraler Partner und Technologietreiber für die regionale Wirtschaft.



Video – take a look inside our cleanrooms

In recent years, we have extensively updated our cleanroom laboratories, plant technology, and equipment. With our 2022 video, we invite you to take a look into our laboratories, which we operate on 2,000 square meters with excellent facilities. They are the basis for our state-of-the-art developments!

Video – Blick in unsere Reinräume

In den vergangenen Jahren haben wir unsere Reinraum-Labore, Anlagentechnik und Ausstattung umfassend erneuert. Werfen Sie mit dem 2022 gedrehten Video einen Blick in unsere Labore, die wir auf 2.000 Quadratmetern mit exzellentem Equipment betreiben. Sie sind die Basis für unsere State-of-the-Art-Entwicklungen!



During the 2022 video shoot in the new cleanroom.
Beim Videodreh 2022 im neuen Reinraum.



In control of finances & figures.

The Finance and Controlling Department is headed by Lihong Giesel (2nd from left). She and her seven-person team handle all of the institute's financial, accounting, and bookkeeping matters. The department manages budgetary and third-party funds amounting to almost 44 million euros in 179 ongoing third-party funded projects. The wide range of tasks includes financial accounting, budget and third-party funds management, cost and performance accounting as well as the official reporting of all taxes and duties of FBH gGmbH. In addition, there is the preparation of the financial reporting to the supervisory board and the shareholder as well as preparation of the annual financial statements in accordance with the German Commercial Code (HGB) and support for internal auditing, project audits, and the annual audit.

Die Abteilung Finanzen und Controlling wird von Lihong Giesel (2. von links) geleitet. Mit ihrem siebenköpfigen Team bearbeitet sie alle finanziellen, bilanziellen und buchhalterischen Aufgaben des Instituts. Sie und ihre Mitarbeiter*innen verwalten Haushalts- und Drittmittel in Höhe von rund 44 Millionen Euro in 179 laufenden Drittmittelprojekten. Zu den Aufgaben gehören die Finanzbuchhaltung, die Haushalts- und Drittmittelbewirtschaftung, die Kosten- und Leistungsrechnung sowie die amtlichen Meldungen aller Steuern und Abgaben der FBH gGmbH. Hinzu kommen die Vorbereitung der Finanzberichterstattung an den Aufsichtsrat und den Gesellschafter, die Erstellung des Jahresabschlusses nach Handelsgesetzbuch (HGB) sowie die Begleitung der internen Revision, Projektprüfungen und der Jahresabschlussprüfung.



TEAM PHOTONICS



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 on basic issues to the development of ready-to-use modules and prototypes. It comprises gallium arsenide-based diode lasers and modules, emitting from the infrared to the UV spectral range, as well as laser diodes and LEDs based on gallium nitride with emission in the UV and violet spectral range. We currently focus on the following topics:

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 und Prototypen. Es umfasst Galliumarsenid-basierte Diodenlaser und -Module, die vom infraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich emittieren, sowie Laserdioden und LEDs auf Galliumnitrid-Basis, die im violetten und UV-Spektralbereich abstrahlen. Aktuell setzen wir die folgenden Schwerpunkte:

- > **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 materials 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 glass fibers is possible. These light sources are ideally suited for applications including display and medical technology.
- > **Laser sensors** – diode lasers customized for applications in sensors and analytics. They are employed, e.g., in miniaturized, portable laser measurement systems, enabling to measure Raman spectra even in highly fluorescent environments.

> **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 eignen sich u. a. für den Einsatz in Displays oder der Medizintechnik.

> **Lasersensorik** – Diodenlaser, die speziell auf Anwendungen in der Sensorik und der Analytik zugeschnitten sind. Sie kommen u. a. in miniaturisierten, portablen Lasermesssystemen zum Einsatz, die Messungen von Raman-Spektren auch in stark fluoreszierenden Umgebungen ermöglichen.

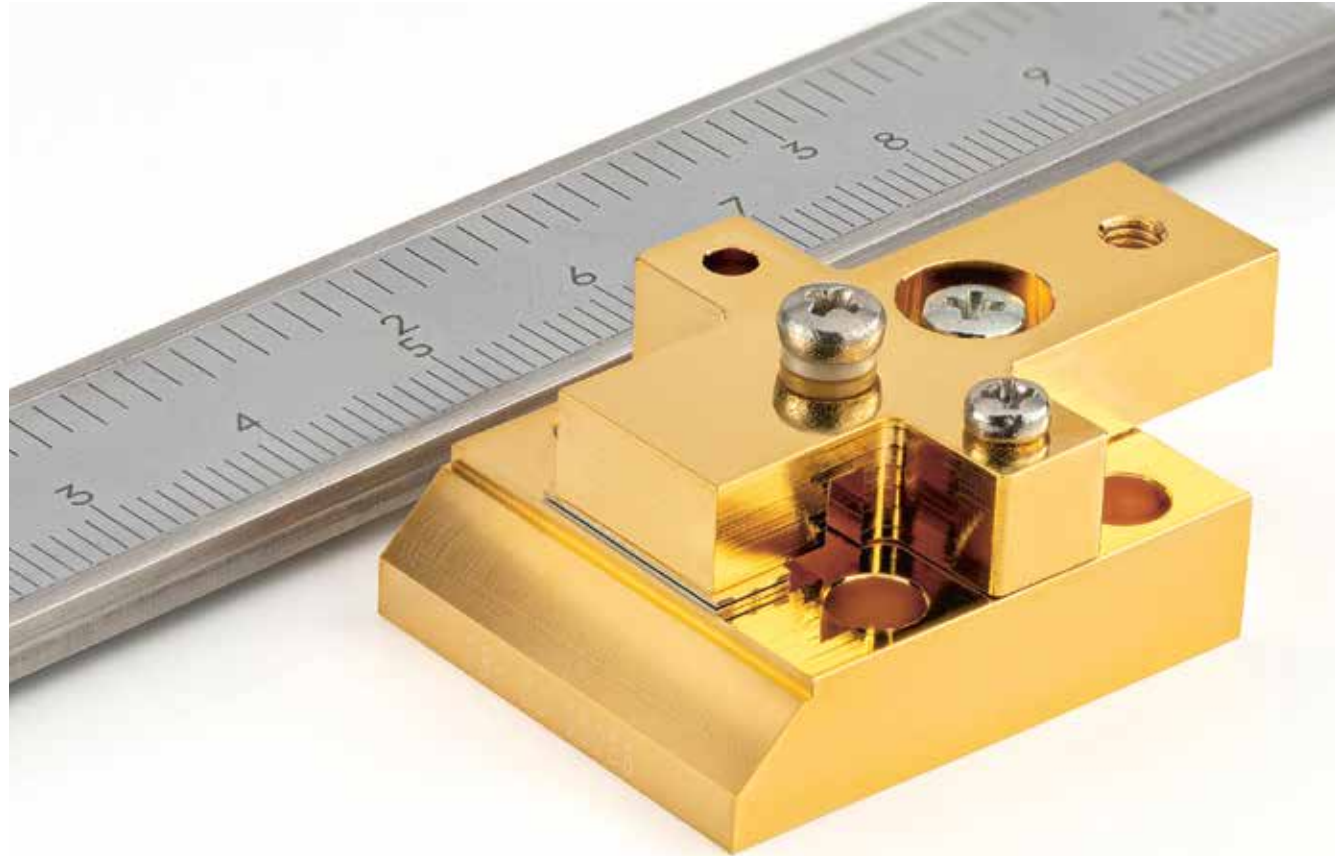
> **GaN optoelectronics** – we develop diode lasers for the violet and UV LEDs for the UVB and UVC spectral range. The LEDs are used in applications such as disinfection (surfaces & skin) and plant irradiation.

Our Optoelectronics Department provides the required basic know-how for these developments: It designs, realizes and characterizes the corresponding diode lasers.

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

Unser Department Optoelektronik stellt das erforderliche grundlegende Know-how zur Verfügung: Es entwirft, realisiert und charakterisiert die zugehörigen Diodenlaser.

Innovation in device technology for brightness-scaling in high-power broad area lasers



⬆ Kilowatts of power in a very narrow beam: FBH technology enables rapid progress in diode lasers.

GaAs-based high-power diode lasers are a critical technology for industry. They provide the optical energy for mass market applications such as car assembly and fabrication of touch-screens in smartphones. Continuously improving these diode lasers is necessary, with ever-higher power needed in an ever-narrower beam, to deliver ever-brighter sources. Lasers with increasing brightness are required not just for current applications but also to enable large-scale applications of the future, such as the generation of power via laser-induced fusion. FBH researchers have recently identified key limits to brightness in diode lasers and developed two innovative semiconductor laser technologies that address them.

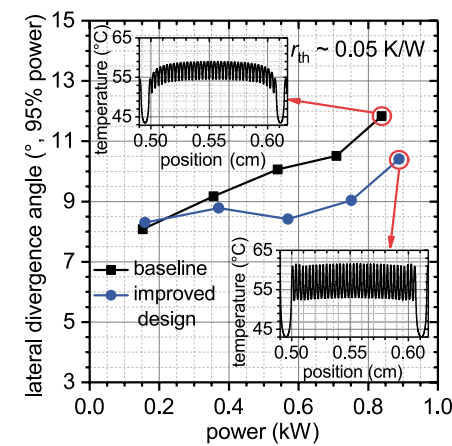
First, when diode lasers are driven to high powers, they heat up. The local heating inside the laser increases the refractive index of the semiconductor, forming a so-called “thermal lens”

that guides light more strongly within the devices. As a result, the emitted light from the laser spreads out over wider lateral angles (wider lateral far field). It is therefore much less intense, which is a problem for industrial laser processes. Also, the strong guiding of light within the device leads to optical power being lost. We have developed new techniques to manipulate the thermal profiles, and have been able to both increase power and reduce the angle of emission (narrower far field) in diode lasers. Research here focused on the key example of 1-cm wide diode laser bars that deliver 1 kW of optical output power at a wavelength of 940 nm, in support of Trumpf. These devices include many laser stripes, each around 1 mm wide, each with its own thermal lens. We then divided the laser stripes into many narrow sub-stripes, and showed that a carefully designed layout can re-distribute the heat inside the laser. This flattens the thermal lens and pushes more heat to the edges of

each stripe. As a result, the variation of temperature inside each stripe is predicted to be 5–10x smaller, and the measured emission (far field) angle is around 2° narrower, as shown in Fig. 1. The conversion efficiency increases by around 5% (not shown).

Second, current spreading. High-power diode lasers are fabricated with wide contact stripes, normally defined by an electrically insulating layer on their top surface. Electrical current is driven through the contact of the laser to produce light in the active region, which is located ~ 2 μm below the surface. The current spreads out over a wide lateral range, and the resulting large pumped area allows the emitted beam to grow wider and wider as power increases. Hence, the far field angle also increases and brightness falls. In a further development, we implemented a deep current block, combining the new state-of-the-art implantation tool with epitaxial regrowth techniques to locate an insulating layer of oxygen deep in the laser, blocking most of the lateral current flow. The oxygen-based current block enabled a very high lateral brightness of > 3.5W/mm-rad (power divided by the product of lateral half angle and width) to now be sustained to a continuous-wave output power of over 18W. This is twofold higher than was previously possible (see Fig. 2). These breakthrough results were achieved in a single emitter with 100 μm stripe width, lasing at a wavelength of 915 nm, in support of Jenoptik. Patent applications are in progress for both of these new technologies, to help protect the interests of our industrial partners.

We thank Trumpf Laser GmbH for supporting design development for flatter thermal lenses. We are also grateful for funds provided by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) to enable the further development of buried implantation within the European Union Eurostars project BRISCL under contract number 01QE2103D.



⬆ Fig. 1. Simulated thermal profile (insets) and measured lateral far field angles (95% power) for a 940 nm kilowatt diode laser bar. Manipulating the thermal profile strongly narrows the far field angle.

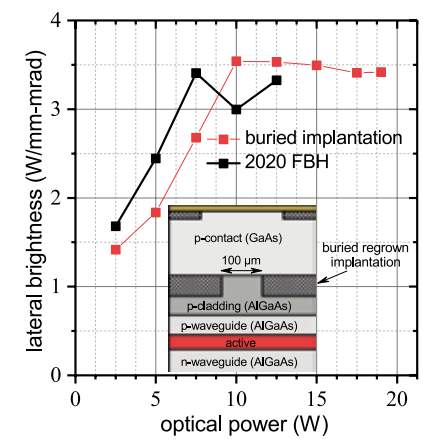
Diodenlaser auf GaAs-Basis mit hohen Ausgangsleistungen sind eine Schlüsseltechnologie für die Industrie. Sie liefern unter anderem die nötige optische Energie zum Schneiden oder Schweißen in der Automobilfertigung. Gefragt sind immer höhere Leistungen in einem immer schmaleren Strahl. Am FBH ist es durch innovative Halbleiter-Lasertechnologien gelungen, die Brillanz von Hochleistungsdiodenlasern weiter zu steigern. Dabei konnten wir insbesondere die laterale Stromausbreitung unterdrücken, indem wir Sauerstoff tief in der Struktur implantiert haben. Zudem haben wir Techniken zum Abflachen der thermischen Linse entwickelt. Beide Technologien zusammen sorgen dafür, dass die optische Leistung in einem engeren Winkel abgegeben wird. Dies wiederum führt zu einer höheren Brillanz der Laser. Die Optimierungen verringern zudem die Verluste in den Lasern und erhöhen die Effizienz. Die Technologien wurden im Rahmen von Industriekooperationen entwickelt und sind durch Patentanmeldungen geschützt.

Publications

P. Crump, M. Elattar, Md.J. Miah, M. Ekterai, M.M. Karow, D. Martin, P. Della Casa, A. Maaßdorf, S. McDougall, C. Holly, S. Rauch, S. Gruetzner, S. Strohmaier, A. Knigge, G. Tränkle, "Progress in experimental studies into the beam parameter product of GaAs-based high-power diode lasers" (invited), Proc. SPIE, vol. 11983, paper 1198307 (2022).

B. King, S. Arslan, A. Boni, P. Della Casa, D. Martin, A. Thies, A. Knigge, P. Crump, "Buried-regrown-implant-structure diode lasers with ultra-thick epitaxy for resistance to mounting stress without loss in efficiency", Proc. SPIE, vol. 12403, paper 124030J (2023).

M. J. Miah, M. M. Karow, M. Elattar, D. Martin, P. Della Casa, S. Grütznert, S. Strohmaier, A. Knigge, P. Crump, G. Tränkle, "Tailored in-plane thermal profiles for narrower lateral far-field in kilowatt-class 9xx nm diode laser bars", Proc. SPIE, vol. 12403, paper 124030I (2023).



⬆ Fig. 2. Measured lateral brightness as a function of output power for a 100 μm stripe laser with 915 nm wavelength. Buried regrown implant lasers (inset) reach much higher powers without losing brightness.

Impact of carrier capture on power saturation of pulsed-driven quantum-well lasers

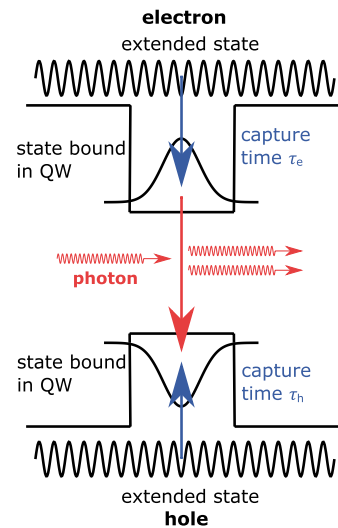


Fig. 1. Schematics of capture process in a quantum well (QW) and generation of photons by stimulated recombination of bound electrons and holes. Vertical axis: energy, horizontal axis: position.

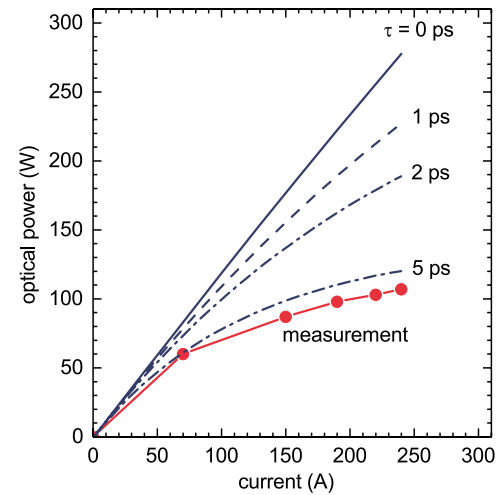


Fig. 2. Optical power emitted versus injection current. Lines: Simulation results for different capture times as indicated. Symbols connected by red lines: Results obtained by short pulse measurement (pulse length 10 ns, repetition frequency 10 kHz).

The power-current (PI) characteristics of ideal diode lasers are linear above threshold. However, deviations from linearity can be observed in reality. PI characteristics of high-power lasers, for example, exhibit a sub-linear behavior far above threshold, i.e., showing a downwards bending of the curve. Such deviations limit the output power of lasers operated in continuous-wave (CW) mode by a roll-over and cause a saturated output of pulsed-driven lasers. This has been studied in detail in a series of recent papers and invited conference presentations by FBH scientists.

In CW lasers, both thermal and non-thermal effects have to be considered to reproduce the experimental results by numerical simulations. Under pulsed operation, self-heating can be neglected, and the power saturation can be attributed alone to non-thermal effects. These include accumulation of nonequilibrium carriers in the optical confinement layers, gain compression, longitudinal spatial hole burning, and two-photon absorption.

There is another effect, which has received little attention so far. Electrons and holes injected by the electrical contacts into the laser belong to so-called extended states and can move

freely within the semiconductor. The stimulated recombination of electrons and holes bound in the quantum well (QW) is responsible for laser action. However, the transformation of extended states into bound states takes a bit of time (Fig. 1).

We performed numerical simulations, revealing that the non-vanishing capture time results in a non-equilibrium of free and bound carriers in a QW laser. Exemplarily, we analyzed an extreme triple asymmetric (ETAS) structure tailored for low series resistance, low optical loss, and low carrier accumulation in the confinement layers. At very high output powers and for sufficiently large capture times, the carrier densities in regions adjacent to the quantum well rose strongly beyond their values at threshold. This resulted in an increased free carrier absorption and non-stimulated recombination, reducing the slope efficiency and causing a downwards bending of PI characteristics (power saturation), which is consistent with experimental results (Fig. 2).

For the layer structure studied, the additional losses due to accumulation of holes in the n-doped region is predicted to be the dominant effect. This can be seen in Fig. 3, where the simulated

Die Leistungs-Strom-Kennlinie eines idealen Diodenlasers ist linear oberhalb der Laserschwelle. Tatsächlich gibt es jedoch Abweichungen von dieser Linearität. So zeigt beispielsweise die Kennlinie bei Hochleistungslasern ein sublineares Verhalten – und damit biegt sich die Kurve nach unten. Dies führt zu einem Überrollen der Kennlinie in Dauerstrichlasern und einer Sättigung der Ausgangsleistung in gepulst betriebenen Lasern. Für dieses Verhalten sind sowohl thermische als auch nicht-thermisch bedingte Effekte verantwortlich.

Wir haben einen speziellen, nicht-thermischen Effekt untersucht, der in der Literatur bislang nur wenig beachtet wurde. In Quantum-Well (QW)-Lasern ist eine gewisse Zeit erforderlich, um die durch elektrische Kontakte injizierten Elektronen und Löcher durch den QW einzufangen. Unsere numerischen Simulationen zeigen, dass diese Einfangzeit zu einem starken Anstieg der Elektronen- und Löcherdichten außerhalb des QWs führt. Dadurch erhöht sich die Absorption an freien Ladungsträgern und die nicht-stimulierte Rekombinationsrate, wodurch die Kennlinie abbiegt.

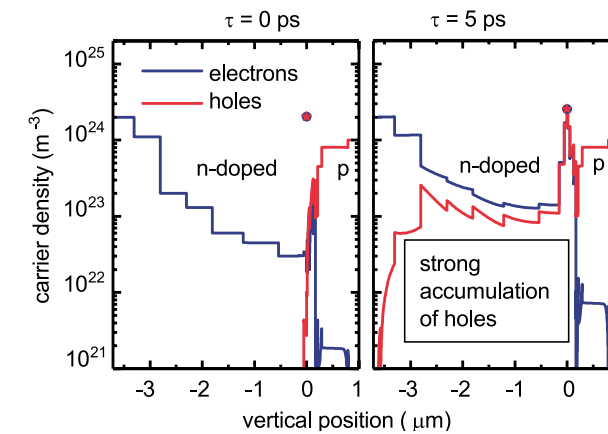


Fig. 3. Vertical profiles of carrier densities of electrons and holes at a current of 240 A for two different capture times (left: 0 ps, right: 5 ps). Dots: bound carrier densities at the position of the QW.

profiles of the carrier densities across the layer stack are shown. For infinitely fast capture corresponding to a vanishing capture time (Fig. 3, left), the free electron density in the n-doped region is given by the donor doping density. No accumulation of free holes is observable. In the p-doped region, a slight accumulation of free electrons with a density of $\approx 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ is visible. The density of bound carriers, given by the lasing condition, is $2 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$. In contrast, for a non-vanishing capture time (Fig. 3, right), there is a strong accumulation of free holes in the n-doped region ($\approx 10^{23} \text{ m}^{-3}$), which requires a corresponding increase of the electron density to obey the neutrality condition. The electron density in the p-doped region increased to $\approx 7 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, too.

Publications

A. Boni, H.-J. Wünsche, H. Wenzel, P. Crump, "Impact of the capture time on the series resistance of quantum-well diode lasers", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 08, pp. 085032, doi:10.1088/1361-6641/ab9723 (2020).

S. Arslan, H. Wenzel, J. Fricke, A. Thies, A. Ginolas, C. Stölmacker, A. Maaßdorf, B. Eppich, R.B. Swertfeger, S.K. Patra, R.J. Deri, M.C. Boiselle, D.L. Pope, P.O. Leisher, G. Tränkle, P. Crump, "Longitudinal spatial hole burning and associated non-uniform current and carrier density profile as a power limit in high power diode lasers" (invited), *Proc. SPIE 12021*, 120210F (2022).

P. Crump, M. Elattar, M.J. Miah, J. Fricke, O. Brox, D. Martin, P. Della Casa, A. Maaßdorf, H. Wenzel, A. Knigge, G. Tränkle, "Progress in efforts to increase power in GaAs-based high-power diode lasers", *Proc. 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, Japan, invited paper TuA-01 (2022).

A. Boni, H. Wenzel, P. Crump, "Capture Time as a Limit to Pulsed Power in 940nm Broad Area Diode Lasers" (invited), *Proc. IEEE Photonics Conference (IPC 2022)*, Canada (2022).

A. Boni, H. Wenzel, P. Crump, "Impact of the capture time on power saturation of quantum-well diode lasers", *Phys. Scr.*, vol. 98, no. 3, pp. 035017, doi:10.1088/1402-4896/acbacc (2023).

2 kW pulse power wavelength-stabilized diode laser bar for LiDAR applications

Diode lasers providing short optical pulses with high pulse power are key components in applications ranging from communication, spectroscopy, and metrology to time-of-flight (ToF) light detection and ranging (LiDAR) systems. Compact, reliable, and power-efficient light sources are needed, e.g., for line-scanning LiDAR systems. These are used, for example, in autonomous driving to detect objects at large distances. Gain-switched diode lasers integrated with tailored electronic drivers that generate a high pulse power with a few nanoseconds long current pulses with amplitudes up to 1 kA are ideal candidates for such LiDAR systems. Energy-efficient use of such systems calls for higher pulse power and a minimization of the required pulse current amplitudes. This can be achieved by epitaxially stacking multiple active regions separated by tunnel junctions. For line-scanning LiDAR, we have developed a distributed Bragg reflector (DBR) broad area laser bar with epitaxially-stacked multiple active regions and tunnel junctions, combining 48 single emitter lasers on one chip.

For the first time, we have successfully transferred the concept of an internally wavelength-stabilized multi-active region DBR laser bar emitting around 911 nm to the nanosecond pulse regime. The laser bar under investigation cleaved from the wafer is 4 mm long, comprising 48 emitters with 50 μm stripe width. Each emitter contains three InGaAs active quantum wells and two GaAs tunnel junctions placed in the nodes and antinodes of the third vertical mode, respectively, in a common optical waveguide. The laser bar was soldered p-side down on a CuW submount and integrated in an in-house developed quadrupole electronic driver. This driver provides a pulse current up to 1 kA in approximately 8 ns long pulses, as can be seen in Fig. 1. To obtain the desired high pulse power from the bar, a current of approximately 23 A has to be injected in every emitter.

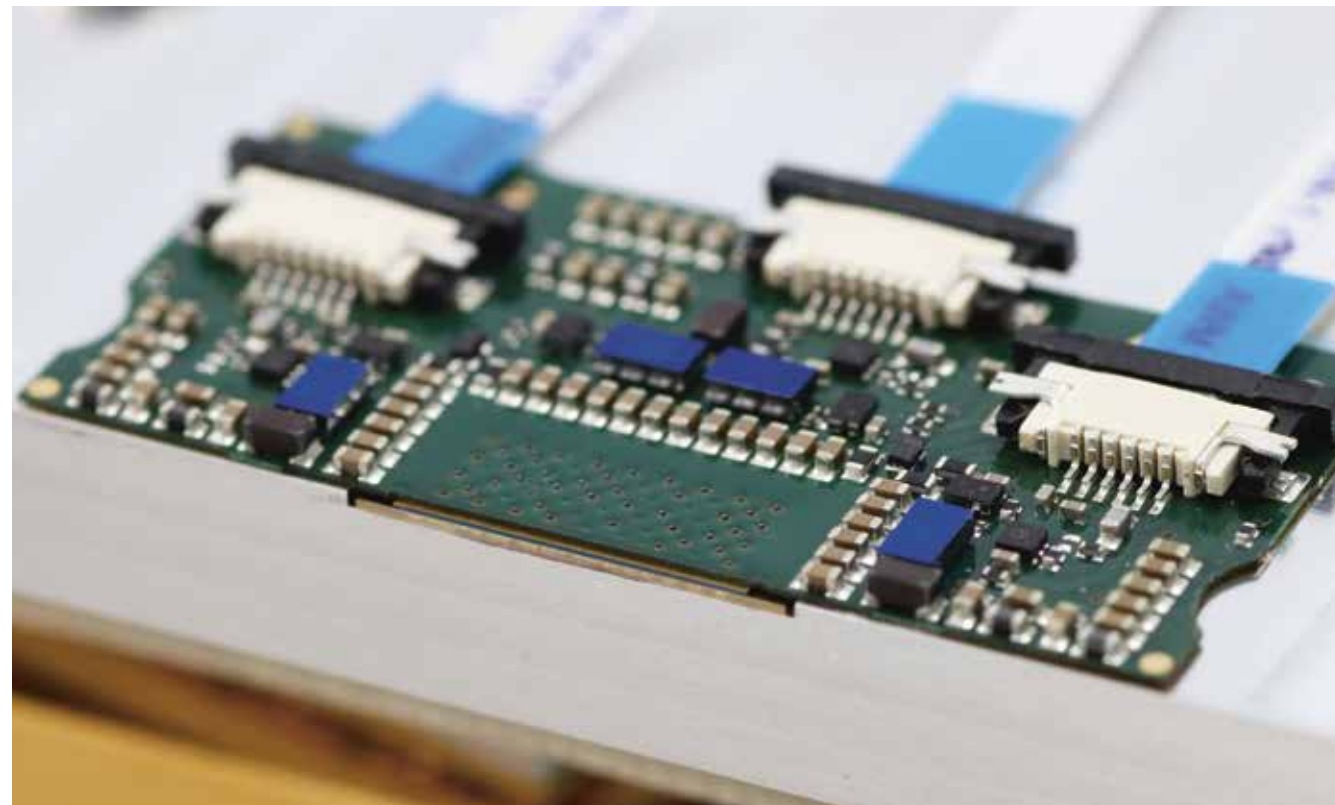


Fig. 1. FBH's high current ns pulsed laser driver with integrated 48-emitter diode laser bar offers unprecedented performance in terms of current and pulse power for LiDAR applications.

Fig. 2 compares laser bars having a single and three active regions. The graph shows that the latter emits a significantly enhanced optical pulse power (factor 2.9) compared to the first. A maximum pulse power of more than 2.2 kW is achieved for pulse currents of 1.1 kA at 25 °C and 45 °C, respectively. Furthermore, a successful stabilization of the wavelength of all three active regions emitting in the third vertical mode could be achieved by implementing a 7th order surface Bragg grating, as can be seen in Fig. 3. The optical spectrum collected from all emitters exhibits a peak wavelength of around 911 nm. The spectral bandwidth measures at most 0.26 nm (FWHM) and is nearly independent of temperature. A temperature-dependent wavelength shift of only about 68 pm/K ($\Delta\lambda = 1.4$ nm for $T = 25$ °C to 45 °C) can be determined, which is the same as what was achieved with single active region.

Thus, the presented 48 emitter DBR laser bar is well suited for line-scanning ToF LiDAR systems that require a high pulse power. These results were presented in Japan at the "International Semiconductor Laser Conference" (ISLC 2022) and awarded the "Big Laser Award" for the highest reported optical power.

This work was partly funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the project reference no. 16FMD02 (Research Fab Microelectronics Germany – FMD) and grant no. 13N15566 as part of WiVoPro.

Laser, die kurze optische Pulse mit hoher optischen Pulsleistung liefern, sind Schlüsselkomponenten für vielfältige Anwendungen. Kompakte, zuverlässige und energieeffiziente Lichtquellen werden unter anderem für Linienscanner in LiDAR-Systemanwendungen benötigt. Diese werden beispielsweise beim autonomen Fahren eingesetzt, um Objekte in großer Entfernung zu erkennen. Der energieeffiziente Einsatz in solchen Systemen erfordert eine höhere Pulsleistung und eine Minimierung der erforderlichen Pulsstromamplituden. Dies kann durch epitaktisches Stapeln mehrerer aktiver Zonen, die durch Tunnelübergänge getrennt sind, erreicht werden.

Das FBH hat erstmalig einen wellenlängenstabilisierten 48-Emitter-DBR-Laserbarren mit drei aktiven Zonen und zwei Tunnelübergängen demonstriert. Er liefert eine optische Spitzenpulsleistung von über 2,2 kW mit 8 ns langen Pulsen bei einem Pulsstrom von etwa 1,1 kA und einer Wiederholfrequenz von 10 kHz. Diese Ergebnisse wurden in Japan auf der „International Semiconductor Laser Conference“ (ISLC 2022) mit dem „Big Laser Award“ für die höchste Leistung ausgezeichnet.

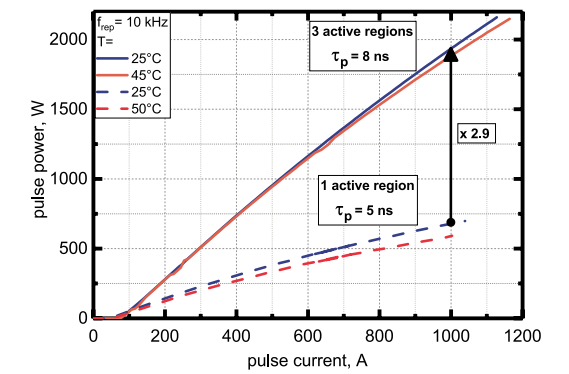


Fig. 2. Optical pulse power of 48-emitter DBR laser bars having a single or three active regions versus pulse current at different temperatures.

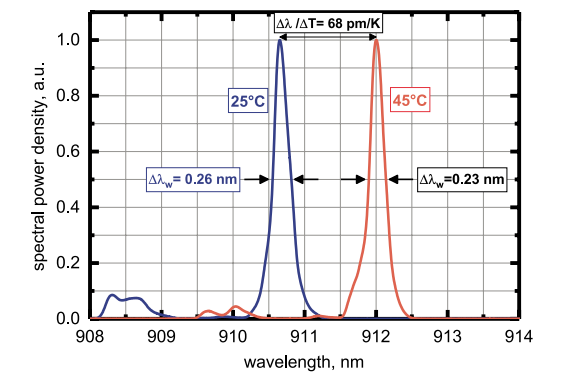


Fig. 3. Time-averaged optical spectra of an 48-emitter laser bar with three active regions operated at 25 °C and 45 °C, with 8 ns pulses, 100 kHz repetition frequency, and a pulse current of 740 A.

Publications

H. Wenzel, J. Fricke, A. Maaßdorf, N. Ammouri, C. Zink, D. Martin, A. Knigge, "Internally wavelength stabilized 910 nm diode lasers with epitaxially-stacked multiple active regions and tunnel junctions", Electron. Lett. 58, 121-123 (2022).

A. Knigge, N. Ammouri, H. Christopher, J. Glaab, A. Liero, J. Fricke, H. Wenzel, "2 kW Pulse Power from Internal Wavelength Stabilized Diode Laser Bar for LiDAR Applications", 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2022), Matsue, Japan, ISBN: 978-4-88552-335-9, TuB-02 (2022).

N. Ammouri, 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 (2023).

Picosecond pulses with 40 W peak power from a tapered laser diode for THz applications

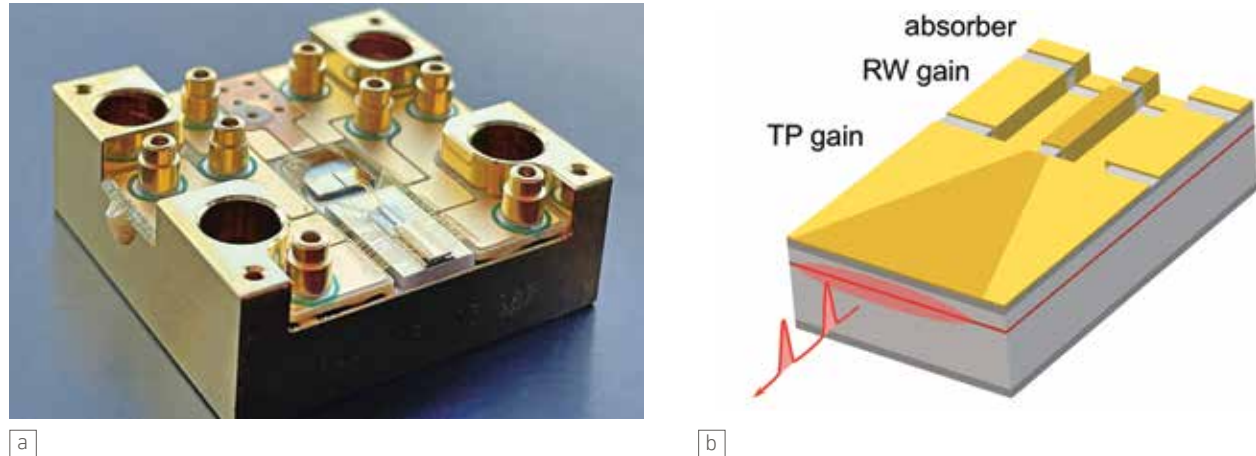


Fig. 1. (a) Laser soldered on a CCP holder, (b) schematic diagram of the tapered diode laser.

Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) is a non-destructive testing technique which has shown its potential in many application fields, including medicine, security, and the food industry. The good temporal resolution of a THz-TDS system is achieved by broadband THz pulses in the picosecond (ps) range. The most commonly employed method to generate such pulsed THz radiation is based on excitation of a photoconductive antenna with femtosecond high-power optical pulses. These are typically provided by a Ti:sapphire laser or a fiber laser. However, the high price, large footprint, and the additional source needed for optical pumping limit the market potential of current THz-TDS systems. In contrast, a mode-locked edge-emitting laser diode with its much smaller size can be electrically pumped, which makes it a promising alternative laser source for more compact and cost-efficient THz-TDS systems. Nevertheless, this requires resolving two main drawbacks of mode-locked laser diodes: the relatively long pulses and the insufficient pulse power.

To address these issues, FBH scientists have realized a monolithic double quantum well laser featuring a tapered (TP) gain section. The diode laser is 6 mm long, consisting of a gain-guided TP gain section and an index-guided ridge waveguide (RW) part, see Fig. 1(b). The RW part is further subdivided into two sections, where the one adjacent to the TP section is operated

as gain section and the other as saturable absorber. By injecting proper electrical currents (I_p for the tapered gain section and I_{rw} for the RW gain section) into the gain sections and by applying a reverse bias voltage (U) to the absorber sections, the longitudinal modes inside the cavity of the laser will be 'locked' with each other in phase, the so-called phase-locking or mode-locking. The modes will constructively interfere with one another and thus generate ultrashort optical pulses.

The designed laser is soldered p-side up onto a conduction cooled package (CCP), as can be seen in Fig. 1(a) For characterization, the CCP is clamped onto a heat sink, whose temperature is stabilized at 20 °C. In pulse characterization measurement, the pulse width first decreases with increasing TP current, reaches its minimum and then slowly increases again, see Fig. 2. The calculated correlating pulse peak power first increases with TP current to over 30 W when the minimum pulse width is reached. It stays at a high level as the pulse gradually broadens, and then starts to drop when the pulse is longer than 4 ps. The shortest pulses measure 2.4 ps (full width at half maximum). For slightly longer pulses with 2.6 ps width, the pulse peak power is as high as 40 W. To the best of our knowledge, this is the highest peak power achieved from a monolithic mode-locked quantum well diode laser.

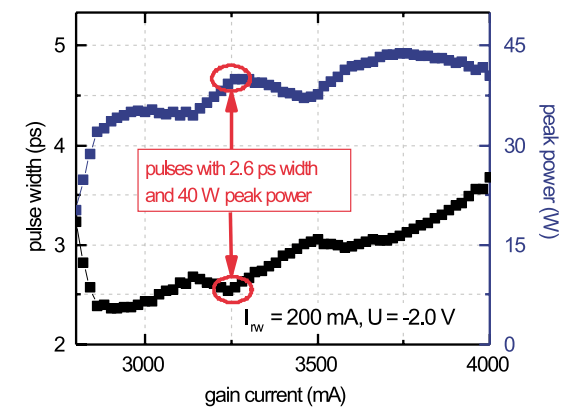


Fig. 2. Pulse width and peak power as functions of TP current.

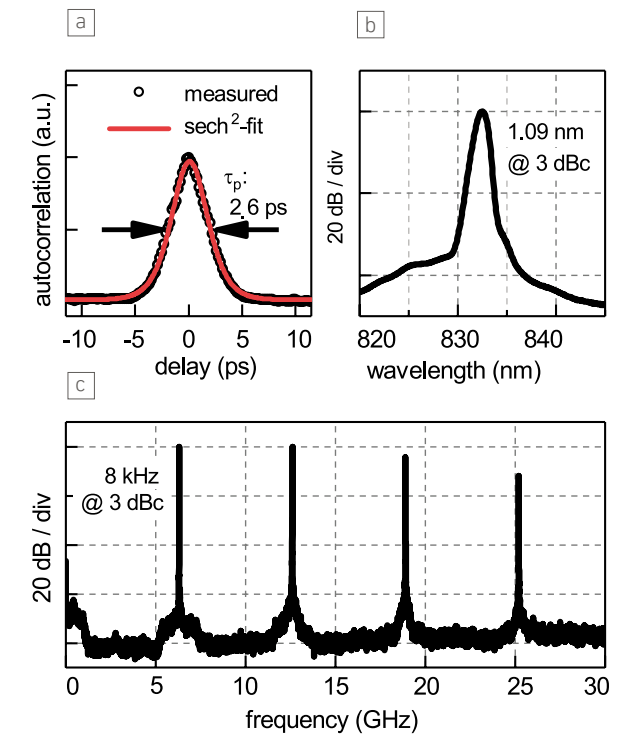


Fig. 3. Exemplary measurements of the laser emitting 2.6 ps pulses with 40 W peak power from Fig. 2: (a) pulse autocorrelation curve, (b) optical spectrum, (c) RF spectrum.

Fig. 3 shows exemplary traces of the laser characterization measurements. From the measured pulse autocorrelation curve in Fig. 3(a), the pulse width can be determined. The central emitting wavelength in Fig. 3(b) is 832.5 nm with a 1.09 nm 3-dB optical bandwidth. The fundamental repetition rate of the generated pulses is around 6.3 GHz with a linewidth of 8 kHz, see Fig. 3(c). The generated pulses are not transform-limited, which means they can be further compressed to a shorter pulse width with more intense peak power and can thus be used to drive THz antennas.

This work is funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under project reference number KN 1333/1-3.

Die Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie (THz-TDS) ist eine besonders effiziente Methode in der Materialanalytik. Jedoch sind die dafür eingesetzten Systeme enorm komplex und teuer, was ihre kommerzielle Nutzung limitiert. Eine der Kernkomponenten ist ein Femtosekunden-Laser. Wissenschaftler*innen am FBH arbeiten nun daran, diese bislang genutzten Festkörper-Lasersysteme durch kostengünstigere Halbleiterlaser in THz-Systemen zu ersetzen. In einem ersten Schritt haben wir demonstriert, dass monolithisch modengekoppelte Diodenlaser Pikosekunden-Pulse erzeugen können. Mit einer aufgeweiteten Verstärkungssektion lassen sich Pulse mit Spitzenleistungen von über 40 W erreichen. Werden diese Pulse komprimiert, können sie direkt zur Terahertz-Pulserzeugung genutzt werden. Das macht diese Laserdioden zu idealen Lichtquellen für zukünftige kompakte THz-TDS-Systeme.

Publication

S. Wohlfel, H. Christopher, J. Fricke, H. Wenzel, A. Knigge, G. Tränkle, "Picosecond pulses with 40 W peak power from a passively mode-locked tapered quantum well laser", *Electronics Letters*, Vol. 59, No. 4, doi: 10.1049/ell2.12736 (2023).

Micromodules with integrated high-performance amplifiers for medical technology



Fig. 1. Fiber-coupled amplifier micromodule with integrated second harmonic generation for super-resolution microscopy.

When the retina in the eye detaches, vision disorders and even blindness can occur. Laser coagulation is an established method to treat such cases using a precise laser beam directed at the retina. This procedure enables physicians to deal with conditions such as diabetic retinopathy and age-related macular degeneration. High-power laser radiation, however, is also essential for cell diagnosis and many other medical applications.

Currently, the laser beam itself is typically generated by bulky and expensive solid-state laser systems. FBH has now developed cost-efficient laser sources that provide high laser output power with excellent beam quality. Starting point were optimized amplifier configurations and extensive simulations that laid the foundation for improvements. Also, back reflection influences were considered, since in most cases radiation from the near infrared range is converted into visible radiation by nonlinear crystals. The devices were then integrated into miniaturized packages, allowing them to be deployed in a wide range of applications.

We have developed two different approaches for further system integration.

On the one hand, we have realized a compact amplifier system that emits a laser beam in the NIR range at high power levels of $P_{\text{opt}} = 8 \text{ W}$. The system features spectral stabilization to a single longitudinal mode and excellent resistance to back reflection. The laser source is set up in a master oscillator power amplifier (MOPA) configuration with an additional miniaturized optical isolator. While the MO introduces the narrow spectral emission width, the high-power output is realized by the PA amplifier. An FBH-developed ridge waveguide (RW) laser is used as master oscillator. Its emission spectrum is stabilized by an integrated distributed Bragg-reflector (DBR). Power amplification is realized by a tapered amplifier, which maintains the high spatial beam quality of the RW laser and significantly increases the output power. The micro isolator is placed between MO and PA to ensure reliable output in power and emission spectrum.

Featuring a footprint of only $25 \times 25 \text{ mm}^2$, the setup is realized on an industry standard CCP3 mount. The emitted radiation provides high spectral stability, beam quality, and optical power and is thus tailored to be used for SHG processes. Emission wavelengths can be selected from a wide range of available sources (626 nm – 1180 nm). Modules emitting at 1064 nm and 1120 nm wavelengths have already been realized with this setup.

On the other hand, we followed an approach that delivers radiation already in the visible range by internal nonlinear frequency conversion (SHG). The module is designed for an optical output power of 200 mW (CW) of visible light. All optical components are installed within a sealed housing, including an RW amplifier and a nonlinear optical crystal. This module is seeded from an external source, allowing for a flexible wavelength range. The seed power is coupled into the module via a polarization-maintaining single-mode fiber and transmitted through a miniaturized optical isolator prior to amplification. The amplifier itself features highly efficient amplification over a wide spectral range. Integration in close proximity to the temperature-sensitive nonlinear crystal is possible due to the amplifier's high efficiency and low thermal footprint. The crystal is also equipped with a ridge waveguide, which increases its conversion efficiency in the projected power range. To transmit the light conveniently to the target, the generated visible light is coupled into an output polarization-maintaining single-mode fiber. This concept

covers the visible wavelength range from blue (420 nm) to orange (590 nm). Prototypes with 561 nm emission wavelength have been manufactured for super-resolution microscopy to enhance cell diagnosis.

This work was partly funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the project "mu-MLE" in the framework "KMU-innovativ: Photonik".

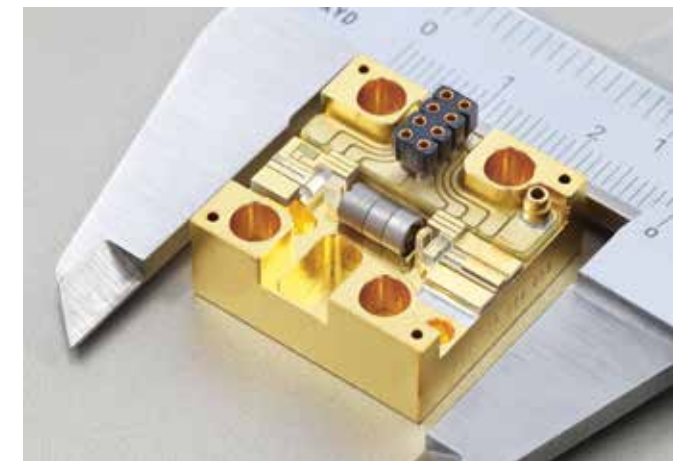


Fig. 2. Free-space output MOPA micromodule with integrated micro isolator for SHG applications.

Die Medizintechnik profitiert in verschiedenen Bereichen von hochintensiver Laserstrahlung. Für die Augenheilkunde und die hochauflösende Mikroskopie haben wir am FBH miniaturisierte Strahlquellen entwickelt. Die Basis dafür lieferten optimierte Verstärkerkonfigurationen und umfangreiche Simulationen. Berücksichtigt wurde dabei unter anderem der Einfluss von Rückreflexen. Diese können entstehen, wenn Strahlung aus dem nahinfraroten in den sichtbaren Spektralbereich mittels nichtlinearer Kristalle konvertiert wird.

So haben wir eine leistungsfähige Strahlungsquelle in Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) Konfiguration mit integriertem optischem Isolator entwickelt. Sie liefert optische Leistungen bis zu 8 W im nahinfraroten Spektralbereich. Ausgangswellenlängen von 620 – 1180 nm sind verfügbar. Das Lasermodul ist spektral stabilisiert, erreicht beugungsbegrenzte Strahlqualität und ist gegen optische Rückreflexe isoliert – und das auf einer Fläche von lediglich $25 \times 25 \text{ mm}^2$.

Eine weitere Laserquelle liefert auf mikroskopischer Ebene sichtbare Strahlung. In diesem Konzept wurde sowohl ein optischer Verstärker als auch ein nichtlinearer Kristall integriert. Auch hier schützt ein miniaturisierter Isolator vor störenden Rückreflexen. Das Modul verstärkt dabei zunächst Licht, welches durch eine externe Quelle über einen Fasereingang bereitgestellt wird. Das hierbei generierte sichtbare Licht wird wiederum in eine optische Faser gekoppelt und kann damit zur späteren Anwendung geführt werden.

Publications

N. Werner, N. Thieß, K. Paschke, G. Tränkle, "Optical Feedback Generated by Tapered Amplifiers Emitting at 1120 nm", IEEE J. Quant. Electron., Bd. 58, Nr. 2, S. 1–8, doi: 10.1109/JQE.2022.3146588 (2022).

N. Werner, P. Hildenstein, H. Wenzel, K. Paschke, G. Tränkle, "Simulation of optical feedback propagating through tapered amplifiers", Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXX, 1199503. doi: 10.1117/12.2609678 (2022).

A versatile light source: 785 nm dual-wavelength Y-branch lasers suited for Raman spectroscopy and THz generation

We have long-term experience in developing wavelength-stabilized dual-wavelength Y-branch lasers emitting at 785 nm. These light sources are ideally suited for Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS), a method used to recover Raman lines from unwanted signals. Here, we take advantage of the physical approach that Raman lines follow any change of the excitation wavelength, whereas fluorescence and background light remain spectrally unchanged. To separate the Raman signals from unwanted interferences, we use two slightly shifted wavelengths whose spectral distance is in the order of the spectral width of the Raman lines. The latter can vary between 10 cm^{-1} (0.6 nm) for liquid and solid samples and up to 120 cm^{-1} (7 nm) for biological samples. Integrated heater elements next to the DBR gratings are used to adapt the spectral spacing. When operating the two branches of the Y-branch lasers in parallel, both emission wavelengths are emitted simultaneously. The above-mentioned spectral distances are in the range between 300 GHz and 3.6 THz. This parallel operation mode together with the heater elements gives us a spectrally tunable THz beat frequency. It can be used to generate tunable THz radiation, which is interesting for several applications including material analysis and thickness measurements.

Fig. 1 shows a manufactured Y-branch laser, which is formed by two connected ridge waveguide (RW) laser cavities. The joint is a so-called Y-coupler, which leads to a common output aperture at the front facet. Two distributed Bragg reflector (DBR) gratings are located at the back facet and ensure wavelength stability. The DBR grating periods are designed to generate the two emission wavelengths around 785 nm with a spectral distance of 10 cm^{-1} (0.6 nm). The device is 3 mm long, the DBR grating lengths are $500 \mu\text{m}$. The RWs forming the Y-coupler are 2 mm long, and the common straight RW output section has a length of $500 \mu\text{m}$. Four separate electrical contacts are implemented. These are the output section contact, the Y-coupler contact, and the two branches L1 and L2. The latter sections provide either individual alternating or common dual-wavelength (parallel) emission. Two individual implemented resistor heaters H1 and H2 next to the DBR gratings allow to tune the wavelength, thus decreasing or increasing the spectral distance.

The power-voltage-current characteristics of the Y-branch laser measured at 25°C are depicted in Fig. 2. With a grounded Y-coupler and 35 mA output section current, the Y-branch laser

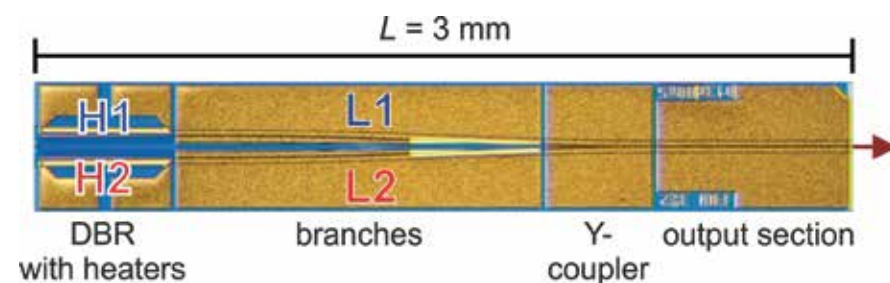


Fig. 1. Photo of a Y-branch DBR-RW laser diode (top view).

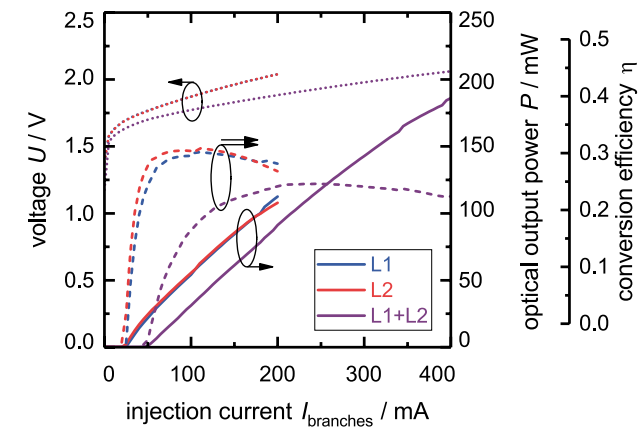


Fig. 2. Electro-optical characterization of the Y-branch DBR-RW laser diode ($T = 25^\circ\text{C}$, $I_{\text{output}} = 35 \text{ mA}$, Y-coupler grounded).

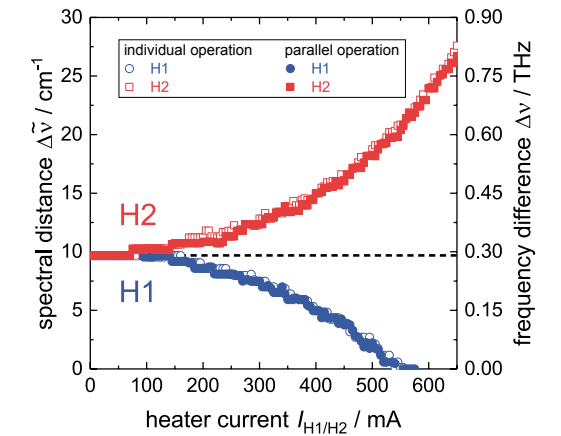


Fig. 3. Spectral distance of a Y-branch DBR-RW laser diode in dependence of heater current for individual and parallel operation mode.

reaches an optical output power of about 100 mW for both emission wavelengths in individual operation mode at 200 mA. In parallel operation mode, 185 mW optical output power is achieved at 400 mA. In individual operation mode, lasing starts at 25 mA. As expected, the start current doubles in parallel operation mode and amounts to 50 mA. The slope efficiency is 0.6 W/A in individual as well as in parallel operation mode. Predominant narrow-band emission is observed for individual operation and up to an optical output power of 65 mW for parallel operation. Fig. 3 shows the spectral tuning, when operating the heaters at an optical output power of 50 mW for individual and parallel operation. As can be seen, the spectral distance in individual operation mode can be tuned from 0 cm^{-1} up to 27 cm^{-1} . In common operation mode, an adjustable frequency distance of 0 THz up to 0.8 THz can be accessed. Larger distances or frequencies can be achieved by adapting the wavelength spacing without heater in the manufacturing process of the gratings.

The results show that Y-branch lasers could be attractive single-chip light sources for combined Raman and THz applications.

Moleküle lassen sich mittels Raman-Spektroskopie zerstörungsfrei bestimmen. Mithilfe des SERDS-Verfahrens (engl: Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy) können die Raman-Signale zudem effizient von Störsignalen getrennt werden. Am FBH haben wir durchstimmbare, wellenlängenstabilisierte Y-Laser mit zwei Wellenlängen bei 785 nm entwickelt. Diese Laser werden für SERDS in einem alternierenden Modus betrieben, sodass jeweils nur eine der Emissionswellenlängen angesteuert wird. Betreibt man die Y-Laser in einem parallelen Modus, in dem beide Emissionswellenlängen gleichzeitig aktiv sind, können sie zum Erzeugen von THz-Strahlung genutzt werden. Dann lassen sie sich unter anderem zur Materialanalyse oder zum Messen von Materialdicken verwenden.

Der Wellenlängenabstand der beiden Emissionswellenlängen kann mittels integrierter Heizer verschoben werden. Für eine optische Ausgangsleistung von 50 mW ist im alternierenden Betrieb ein SERDS-Abstand von 0 bis 27 cm^{-1} und im parallelen Betriebsmodus eine THz-Frequenz von 0–0.8 THz einstellbar. Das macht den Y-Laser zu einer kompakten Lichtquelle, die sich ideal für kombinierte Raman- und THz-Anwendungen eignet.

Publication

L.S. Theurer, B. Sumpf, M. Maiwald, A. Müller, J. Fricke, P. Ressel, A. Knigge, G. Tränkle, "Comparison of individual and common wavelength-operation for 785 nm Y-branch DBR ridge waveguide diode lasers with adjustable spectral distance", Applied Optics 61, 5419-5427, doi: 10.1364/AO.458500 (2022).

Using Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy for quality control of animal feed pellets

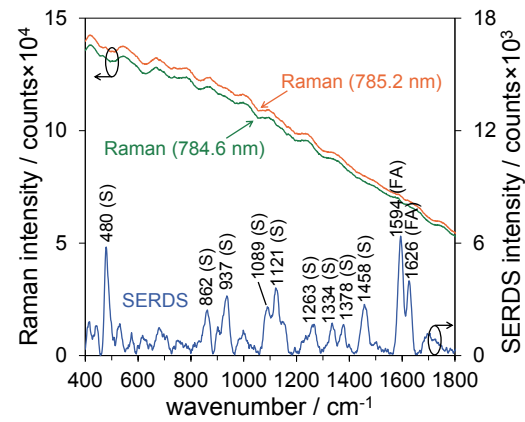


Fig. 1. Raman (top) and SERDS (bottom) spectra obtained on a single measurement spot of an intact wheat grain. Labels in the SERDS spectrum indicate identified Raman signal positions of wheat components starch (S) and ferulic acid (FA).

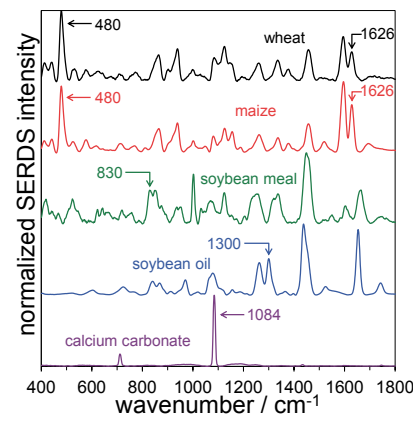


Fig. 2. SERDS spectra obtained from pure substances used for pellet production. Only constituents present at concentrations of 1% or above within the final pellet are shown. Arrows with numbers mark indicator Raman bands used to identify individual substances.

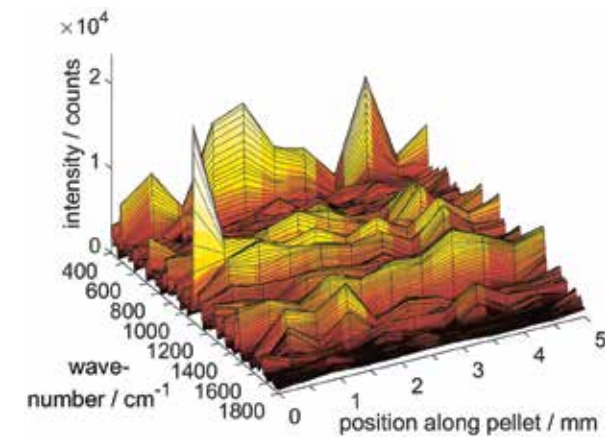


Fig. 3. The three-dimensional visualization of SERDS spectra recorded at 11 positions along a selected feed pellet over a total length of 5 mm highlights the spatially heterogeneous distribution of individual components.

A balanced diet for farm animals using high-quality feed pellets is very important to ensure both health of the livestock and quality of the meat. The nutritive value of these pellets strongly depends on the raw materials used to produce them. Comprehensive quality control of raw materials, additives, and the final pellets is thus essential. However, conventional laboratory methods are time-consuming, and the invasive analysis requires complex and expensive instruments. The demand for in situ monitoring using fast, simple, and non-destructive methods is therefore high, for example to determine the major ingredients of feed pellets.

Optical inspection techniques are very promising in this instance. Raman spectroscopy is particularly well suited as it provides a unique molecular fingerprint, requires no sample preparation, and is only slightly disturbed by water. However, background interferences like laser-induced fluorescence or ambient light can easily mask the Raman spectroscopic information. Shifted excitation Raman difference spectroscopy (SERDS) is a well-established technique to efficiently remove such disturbing contributions. The technique uses a physical approach with two

slightly shifted laser wavelengths. For SERDS, we have designed and developed specialized 785 nm dual-wavelength diode lasers at FBH.

We carried out SERDS investigations on raw materials used for feed production and on intact animal feed pellets using a customized laboratory setup. Fig. 1 (top) exemplarily shows the Raman spectra of an intact wheat grain as selected pellet constituent excited with two emission wavelengths (785.2 nm and 784.6 nm). In the Raman spectra, the molecule-specific information is superimposed by a strong fluorescence background caused by the outer layer of the grain. The SERDS spectrum presented in Fig. 1 (bottom) highlights the capability of the technique to effectively extract Raman signals from such backgrounds. Here, we detected the presence of the two main wheat constituents (starch and ferulic acid) and identified their Raman signals (labelled with numbers) with literature.

We also acquired SERDS spectra for the other major feed pellet components maize, soybean meal, soybean oil, and calcium carbonate. These raw materials are present in the feed pellets

Die hohe Qualität von Futter-Pellets bei der Nutzzierhaltung ist entscheidend für die Gesundheit der Tiere und die spätere Fleischqualität. Der Nährwert der Pellets hängt insbesondere von den Rohstoffen ab, die verwendet wurden. Daher muss sowohl die Qualität der Rohstoffe als auch die der fertigen Pellets umfassend kontrolliert werden. Eine Analyse ist mithilfe optischer Methoden schnell, einfach und zerstörungsfrei möglich. Mit der Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS) lassen sich molekül-spezifische Raman-Signale der Proben effektiv von Störeinflüssen wie Fluoreszenz oder Umgebungslicht trennen.

Mit einem angepassten Laboraufbau haben wir SERDS-Untersuchungen an Futter-Pellets sowie deren Bestandteilen durchgeführt. Als Anregungslichtquelle haben wir einen 785 nm Zwei-Wellenlängen-Diodenlaser verwendet und die Pellets damit qualitativ und orts aufgelöst beprobt. Pellet-Bestandteile mit Konzentrationen von mindestens 1% konnten wir so erfassen und identifizieren. Diese Untersuchungen schaffen die Grundlage für zukünftige Qualitätskontrollen von Futter-Pellets und deren Rohstoffen an ausgewählten Punkten entlang der Prozesskette.

at concentrations of 1% or above. Based on their spectra displayed in Fig. 2, we determined indicator Raman signals for substance identification within the pellets. These signals are labelled by numbers in Fig. 2. In the case of wheat and maize, detection and identification of starch (480 cm^{-1}) and ferulic acid (1626 cm^{-1}) is possible.

In the next step, we applied SERDS to track the distribution of these pellet ingredients spatially resolved on intact feed pellets using the specified indicator Raman bands. SERDS spectra were recorded at 11 positions with a spatial separation of 0.5 mm along the pellet surface. As presented in Fig. 3, the spatial distribution of individual components shows strong variations in the content of starch, calcium carbonate, and ferulic acid within the investigated area on the pellet.

These results demonstrate that SERDS is a promising technique for raw material identification and feed pellet inspection. The study forms a solid basis for systematic animal feedstuff analyses towards quality control, and it is ideally suited to pave the way for future applications at selected points along the process chain.

This work was conducted within the project "Shifted excitation Raman difference spectroscopy testing for analysis of inorganic phosphorus, inositol phosphates, and myo-inositol in environmental and animal samples (SERAIP)", funded by the Leibniz Science Campus Phosphorus Research Rostock.

Publication

K. Sowoidnich, M. Oster, K. Wimmers, M. Maiwald, B. Sumpf, "Shifted excitation Raman difference spectroscopy as enabling technique for the analysis of animal feedstuff", *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 52, no. 8, pp. 1418-1427 (2021).

Reliable GaN-based laser sources for quantum technology

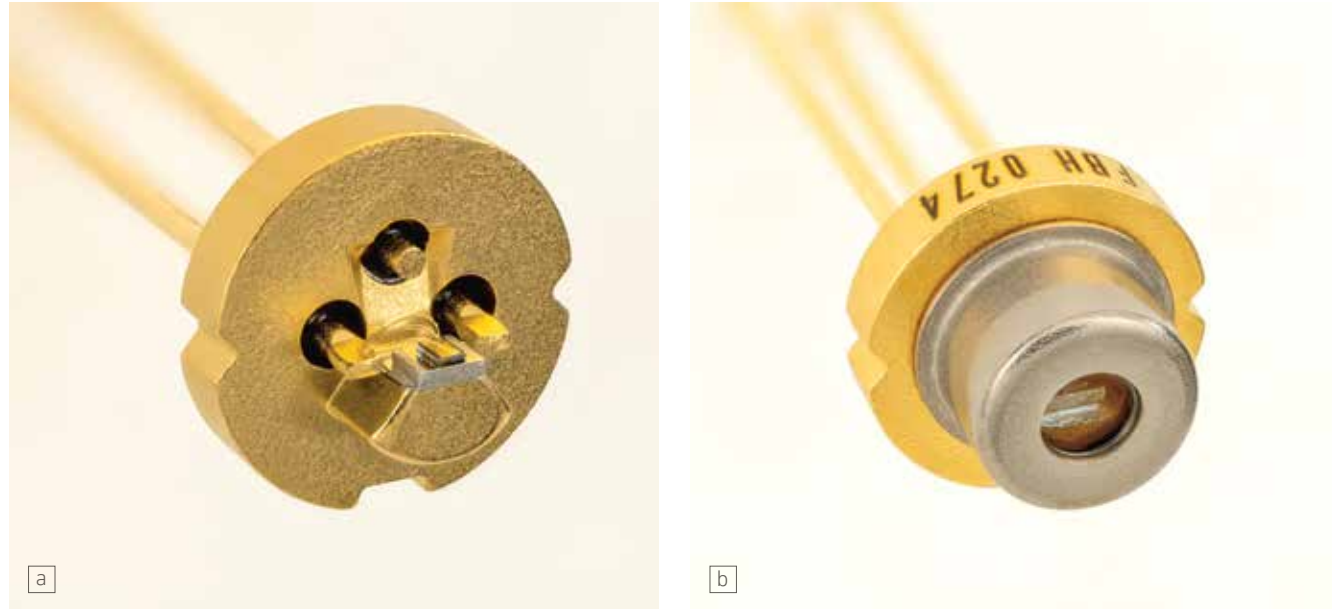


Fig. 2. (a) A GaN-laser chip on submount in a TO56 package without and (b) with hermetically sealed cap.

At FBH, we develop GaN-based laser diodes that emit in the violet-blue wavelength range. They can be used for a wide range of applications, such as sensing, optical projection, and quantum technology. These FBH lasers can then be integrated into external cavity diode lasers to provide narrow-band emission, which is required, e.g., for rubidium-based optical atomic clocks to be operated in space. High reliability and long lifetime are therefore basic requirements. So far, we were able to increase the lifetime to more than 6,000 h by optimizing the entire process

chain, from epitaxy through chip processing to packaging. In order to further increase the reliability, we have investigated failure mechanisms of the lasers in detail. With the help of lifetime measurements on large batches of devices, we were able to identify systematics in the failure behavior.

Nominally identical ridge waveguide (RW) laser chips (sized $400\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ with $2\ \mu\text{m}$ wide ridges) that emit at a wavelength of about 420 nm were soldered in p-up configuration first onto submounts and then onto c-mounts. The lasers were operated at a constant output power of 20 mW in a laboratory atmosphere. Lasers with operating currents beyond 50 mA tended to exhibit early failures at operating times below 1,000 h. Lasers with lower thresholds and thus initial operating currents below 50 mA generally had lifetimes between 1,000 h and 4,000 h. It is noticeable that the operating current shortly before laser failure was typically between 80 mA and 100 mA (see Fig. 1). However, the degradation rate, i.e. the raise of operation current per time of the individual lasers varies significantly.

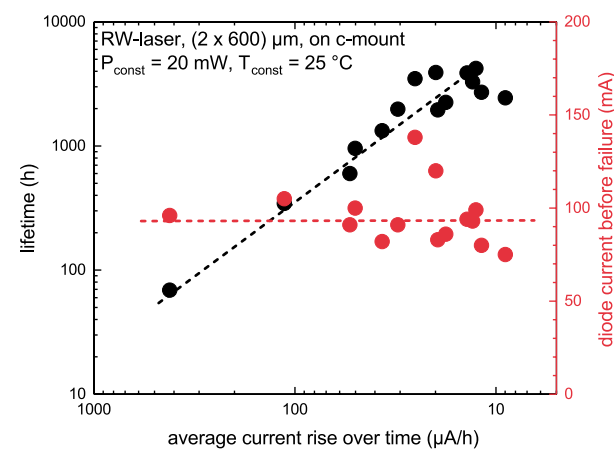


Fig. 1. Laser diodes with significantly different degradation rates fail at similar currents, therefore lower degradation rates (at comparable thresholds) result in longer lifetimes.

We found two obvious changes in the failed lasers. Firstly, the leakage current increased during operation. Lasers that exhibit a short circuit after failure always show destroyed areas of the ridge between the laser facet and the p-metal bond pad. Secondly, the formation of a SiO_x layer can be observed on the output facet in the optical mode region. The laboratory atmosphere could be identified as the source of this deposit. So far, it has not been clearly understood to which extent these deposits lead to device failure. Nevertheless, laser chips were hermetically sealed under defined atmosphere in TO packages (see Fig. 2). Again, we have found that lasers with operating currents below 50 mA show lifetimes of several 1,000 h. But lasers in TO packages seem to withstand higher currents and do not necessarily fail at around 100 mA. Overall, longer lifetimes are possible, up to now maximal 6,000 h (in this case for a $3\ \mu\text{m}$ wide ridge, compare Fig. 3).

We will further investigate the exact relationships between degradation rate, increase in leakage current, formation of facet deposits in certain atmospheres, and the final failure of the device. Material analysis studies, including electron microscopy of the failed devices, are on the way. Moreover, adjustments in chip processing, such as preventing a current flow in the vicinity of the facets and a modified facet technology will be addressed.

These activities are supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) in the framework of the project "Development of a laser source for a rubidium based optical atomic clock (LARUS)" (contract 50WM2179).

Publication

L. Uhlig, C. Becht, E. Freier, J.H. Kang, V. Hoffmann, C. Stölmacker, S. Einfeldt, U.T. Schwarz, "Micro-electroluminescence and micro-photoluminescence study on GaN-based laser diode aging", Proc. SPIE 12001, Gallium Nitride Materials and Devices XVII, 1200106, doi: 10.1117/12.2609394 (2022).

Wir entwickeln monomodige GaN-Rippenwellenleiterlaserdioden, die im blau-violetten Spektralbereich emittieren. Zusammen mit einem externen Resonator können sie zu schmalbandigen Quellen kombiniert werden und so künftig in Rubidium-basierten Atomuhren eingesetzt werden. Die Voraussetzung für den Einsatz im Weltraum sind langlebige und zuverlässige Bauteile. Durch Optimierungen der Prozesskette – angefangen bei Substrat und Epitaxie über den Chipprozess bis hin zum Aufbau der Laserdioden – ist es uns bereits gelungen, die Lebensdauer bei konstanter Ausgangsleistung von 20 mW auf über 6.000 h zu erhöhen. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Laser, unabhängig davon wie schnell sie degradieren, bei einem ähnlichen kritischen Strom ausfallen. Die ausgefallenen Laser zeigen Ablagerungen an der Facette im Bereich der optischen Mode und häufig Zerstörungen der Rippe zwischen Bondpad und Facette. Um die Lebensdauer weiter zu erhöhen, untersuchen wir diese Ablagerungen derzeit mittels Elektronenmikroskopie und konnten bereits nachweisen, dass diese in hermetisch versiegelten TO-Gehäusen geringer sind.

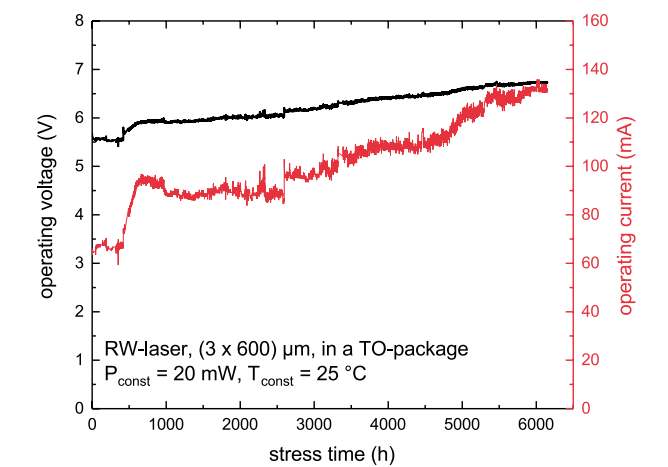


Fig. 3. Ongoing lifetime measurement at constant output power of an RW-laser in a hermetically sealed TO-package.

Ultraviolet micro-LEDs and arrays with enhanced efficiency are opening up novel applications

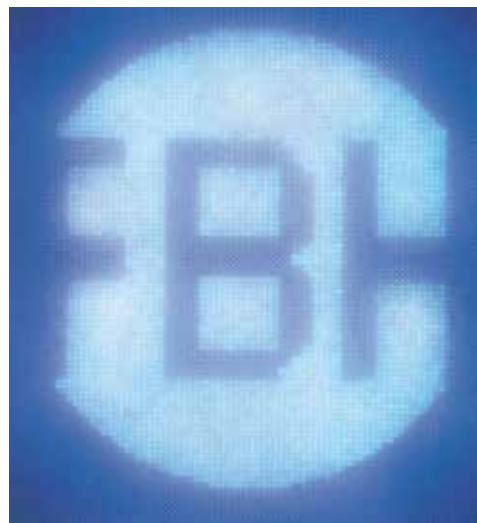


Fig.1. UV irradiation pattern from an array of UVB micro-LEDs with a pixel diameter of 1.5 μm and a pitch of 2 μm shaped as FBH logo (diameter 158 μm).

Light-emitting diodes (LEDs) with diameters below 100 μm (micro-LEDs or μLEDs) and emission wavelengths in the visible spectral range are already widely used, particularly in displays. However, ultraviolet LEDs (UV LEDs) have so far been developed mostly for high-power applications that require large emitters. Recently, FBH has successfully extended the wavelength range of μLEDs into the UVB ($\lambda = 280 - 315 \text{ nm}$) and UVC ($\lambda \leq 280 \text{ nm}$) spectral range. Long-term aim is to realize UV radiation sources whose radiation patterns can be flexibly switched on the micrometer scale. This will render new applications possible, such as in rapid prototyping, mask-free photo lithography, sensing, non-line-of-sight communication, and high-speed data transfer.

The UV μLEDs were fabricated by patterning Al(In)GaN with small single emitters and densely packed arrays of these. The

heterostructures were grown by metal-organic vapor phase epitaxy on 2" sapphire wafers. The AlN base layers and the LED heterostructure were optimized for single peak emission at 300 nm (UVB) or 233 nm (far-UVC). To enable high-resolution patterning processes on the strongly convexly bowed wafers, the bow was first reduced by inducing compensating stress from crystal defects in the sapphire using an internally focused laser.

The front-end processing was optimized and adapted for small dimensions and the AlInGaN material system. Smallest structure dimensions were below 1 μm, with dry etched mesa diameters down to 1.5 μm and structure pitches down to 2 μm. The main challenges in creating such tiny structures were the high resolution and high alignment accuracy required during photo lithography, plasma etching, and metal deposition. For example, undesired reflections needed to be suppressed during resist exposure in photo lithography, and alignment control was optimized for accuracies below 50 nm. To enhance light extraction, the plasma dry etching process to define the emitting mesa was tuned to create slanted sidewalls, and different insulator materials were used.

Measurements of the μLEDs and associated arrays on wafer level show that reducing the mesa diameter significantly increases the external quantum efficiency (EQE) of the LEDs. This effect was most pronounced if non-UV absorbing SiO₂ instead of SiN_x was used as insulator material. For the 233 nm far-UVC μLED arrays, the peak EQE increased from about 0.2 to 1.5% with a maximum output power of up to 1 mW at 20 mA on wafer level when reducing the mesa diameter from 100 μm to 1.5 μm and using SiO₂. This is mostly attributed to an increased extraction efficiency of the generated radiation from the chip, since in far-UVC LEDs the active region of the heterostructure preferentially emits parallel to the chip surface. For diameters above

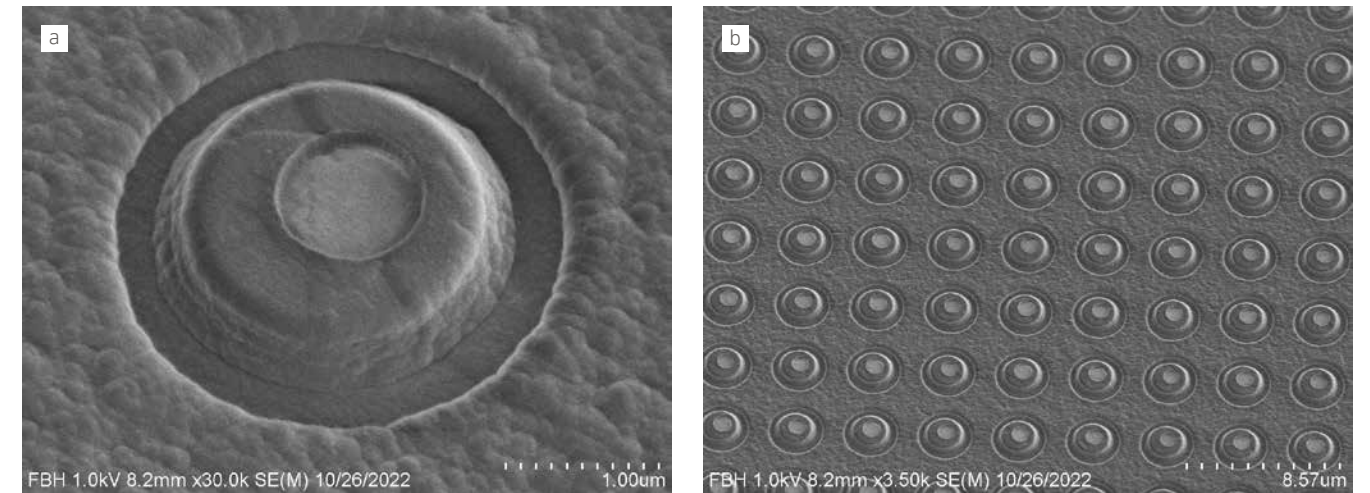


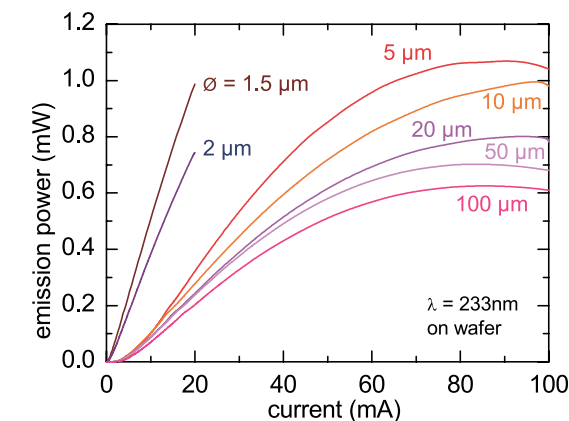
Fig. 2. Electron micrograph of (a) a single UV micro-LED and (b) an array of LED pixels with 1.5 μm diameter and 4 μm pitch.

50 μm, the UV radiation is mostly generated far from the reflecting tilted mesa sidewalls and the EQE is independent of the mesa size.

While currently all UV micro-emitters in an array on a chip are operated simultaneously, our next step is to individually address them via a control chip. This will allow us to generate and quickly modulate individual irradiation patterns. When used for mask-free photolithography, for example, individual structures could thus be created on semiconductor wafers easily, quickly, and cost-effectively. We are open for partners to jointly develop this technology for this next step.

Publication

J. Rass, H.-K. Cho, M. Guttmann, D. Prasai, J. Ruschel, T. Kolbe, S. Einfeldt, "Enhanced light extraction efficiency of far-ultraviolet-C LEDs by micro-LED array design", Appl. Phys. Lett. 122, 263508 (2023).



Am FBH haben wir UV-Mikro-LEDs entwickelt, die neuartige Anwendungen ermöglichen, unter anderem im Rapid Prototyping, in Sensorik und Kommunikation. Diese LEDs können sowohl einzeln genutzt als auch in dicht gepackten Arrays angeordnet werden. Sie basieren auf Halbleiterstrukturen, die auf Saphirwafern abgeschieden wurden und bei 233 nm (Fern-UVC) beziehungsweise 300 nm (UVB) emittieren. Bei der lithographischen Strukturierung bestand die größte Herausforderung darin, die nötige Auflösung und Justagegenauigkeit für Strukturen von unter 1 μm zu erreichen. Dafür haben wir unter anderem die starke Verkrümmung der Wafer durch Laserritzprozesse reduziert und Prozessparameter an das transparente Substrat angepasst. Durch Plasmaätzen sowie Metall- und Isolatorabscheidung entstanden schließlich UV-Mikro-LEDs mit Durchmessern von 1,5 bis 100 μm und Arrays mit Abständen bis hinab zu 2 μm.

Elektro-optische Messungen zeigen, dass die optische Leistung und externe Quanteneffizienz (EQE) erheblich steigt, je kleiner der Durchmesser der Emitterfläche ist. Der Neigungswinkel der Mesakante muss dazu nahe bei 45° liegen und der darauf aufgebrauchte Isolator UV-transparent sein. Dadurch kann in der Chipebene emittierte UV-Strahlung umgelenkt und effizienter extrahiert werden. Dieser Effekt ist bei den Fern-UVC-LEDs besonders stark. UV-Mikro-LED-Arrays mit 1,5 μm Mesadurchmesser und Emission bei 233 nm erreichen auf Waferebene eine EQE von 1,5% und eine Spitzenleistung von 1 mW bei 20 mA.

Fig. 3: Emission power on wafer level of 233 nm μLED-arrays with diameters of 1.5 – 100 μm. The peak power of the LEDs is reached at lower currents for smaller diameters.

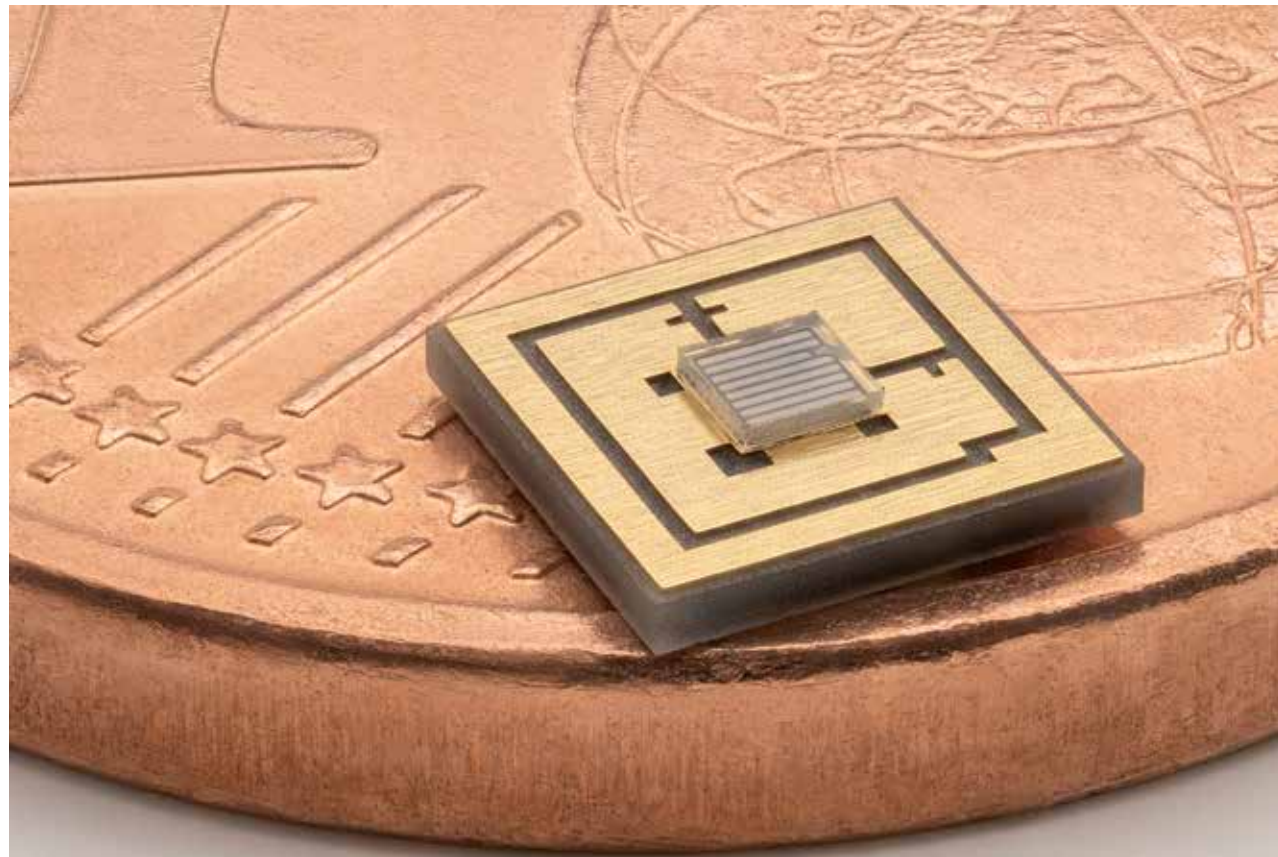


Fig. 1. Deep-UV LED: 1 mm x 1 mm chip on a 3.5 mm x 3.5 mm ceramic submount.

In-depth spatially resolved investigations on UV LEDs to understand their degradation

AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes with emission wavelengths in the UVB or UVC spectral range (deep-UV LEDs) are promising devices, which are expected to replace discharge lamps in many applications. Wavelengths at about 310 nm, for example, can be used for plant-growth irradiation. Recent studies show that this irradiation stimulates the production of secondary metabolites in plants. These substances are known to have health benefits as they can reduce the likelihood of developing a cardiovascular disease and cancer. In contrast, 230 nm LEDs can inactivate viruses, fungi, and bacteria on the human skin without harming it.

However, the emission power of deep-UV LEDs typically decreases during long-term operation. This can be attributed to degradation mechanisms that occur within the layer structure of the

LED. The lifetime after which the emission power reduces to 70% (L70) is comparably short and typically ranges from several 100 to several 1,000 h, which limits the applicability. At FBH, we continuously strive to better understand the degradation behavior of UV LEDs and to increase their lifetime. To achieve this, we conduct aging experiments under different conditions and apply targeted adjustments to the manufacturing process. We could already identify the operation current density as accelerating factor of degradation [1]. Moreover, we found that the overall radiative recombination efficiency in the active region decreases during device operation. In collaboration with the Max-Born-Institut, we have now moved on to study how current density and radiative recombination efficiency are spatially distributed within the LED chip during long-term operation [2].

In our investigations we combined electrical and optical excitation of the active region while imaging its light emission by a UV camera (Figs. 2 and 3). This made it possible to distinguish between spatial variations in current density and in efficiency of radiative recombination of charge carriers. It turned out that the homogeneity of both spatial distributions decreases during operation. Moreover, they are complementary to each other, i.e. areas of high current density correspond to areas of low radiative recombination efficiency and vice versa. The results lead to the interpretation that during operation, the distribution of the light emission in the active region is mainly determined by the distribution of the current density and not of the radiative recombination efficiency. Furthermore, the degradation seems to be more prominent in the areas of high local current density. Considering the non-uniform current density also allowed us to resolve the contradiction between the magnitudes of reduced carrier lifetime and decreased total optical power of the LED.

Overall, to improve long-term stability of the devices, it would be advantageous to maintain a homogeneous current density distribution during long-term operation. It seems likely that these findings can be transferred to the development of far-UVC LEDs. Consequently, optimizations of LED semiconductor heterostructure and chip design that are expected to affect the current density distribution will be the next steps to gain longer lifetimes of our UV LEDs.

This work was partially supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) through the Twenty20 initiative "Advanced UV for Life" under contract no. 03ZZ0130A.

Das FBH arbeitet intensiv daran, neben der optischen Leistung von UV-LEDs auch deren Langzeitstabilität zu erhöhen. Daher untersuchen wir die physikalischen Mechanismen, die dafür sorgen, dass die optische Leistung im Betrieb abnimmt. Räumlich aufgelöste Messungen der Foto- und Elektrolumineszenz haben nun gezeigt, dass die Stromverteilung im Chip bei dessen Betrieb inhomogener wird und damit Ladungsträger inhomogener nichtstrahlend rekombinieren. Mit diesen Ergebnissen passt die abnehmende optische Leistung der UV-LEDs beim Langzeitbetrieb nun auch quantitativ zur abnehmenden Lebensdauer der Ladungsträger in der aktiven Zone. Wir sind daher überzeugt, dass der Weg zu längeren Lebensdauern unserer UV-LEDs über homogenere Eigenschaften des Halbleiters und des Chips führt.

Publications

[1] J. Ruschel, J. Glaab, B. Beidoun, N. Lobo Ploch, J. Rass, T. Kolbe, A. Knauer, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Kneissl, "Current-induced degradation and lifetime prediction of 310 nm ultraviolet light-emitting diodes", *Photonics Res.* 7(7), p. B36, DOI: 10.1364/PRJ.7.000B36 (2019).

[2] J. Ruschel, J. W. Tomm, J. Glaab, T. Kolbe, A. Knauer, J. Rass, N. Lobo Ploch, T. A. Musengezi, S. Einfeldt, "Spatially resolved degradation effects in UVB LEDs stressed by constant current operation", *Appl. Phys. Lett.* 122, 131103, DOI: 10.1063/5.0141530 (2023).

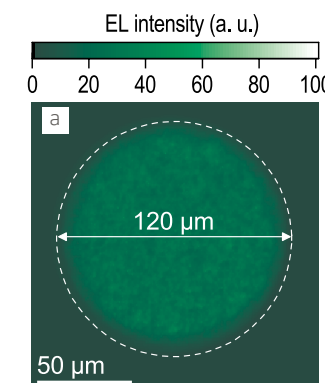


Fig. 2. Electroluminescence (EL) intensity distribution of the current carrying area (120 μm in diameter) of a UVB LED before (a) and after (b) 42 h operation under accelerated stress conditions (nominal current density 200 A/cm²).

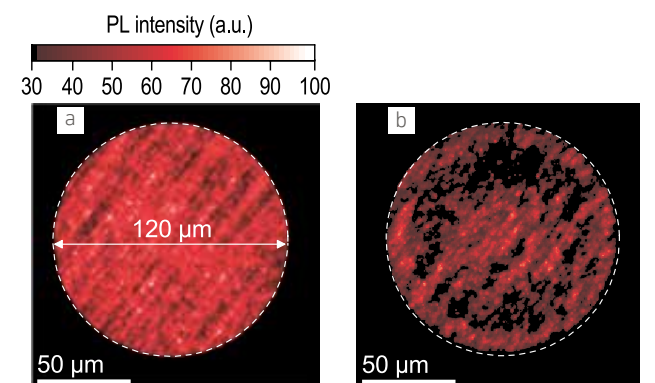
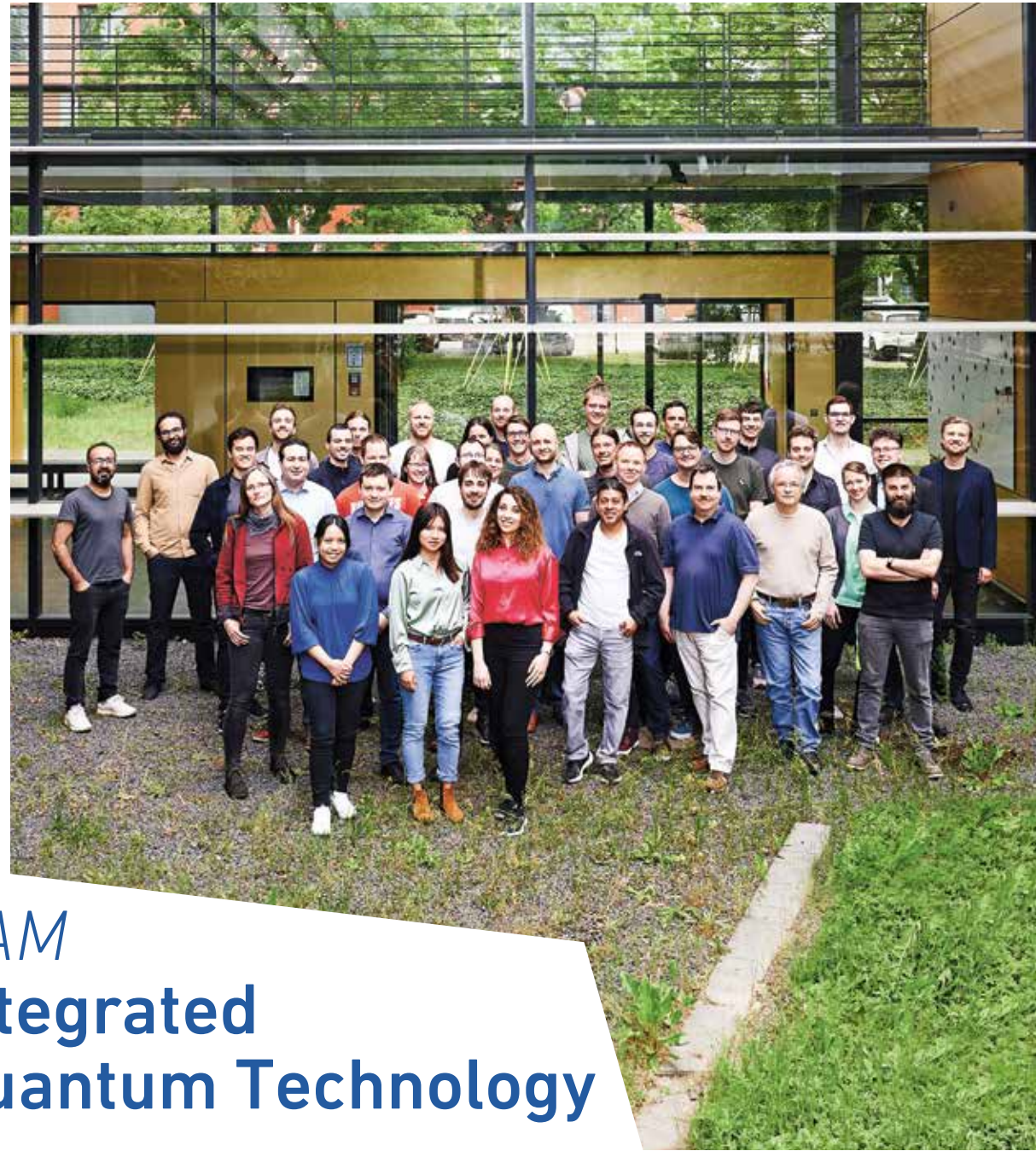


Fig. 3. Photoluminescence (PL) intensity distribution as an indicator for the efficiency of the radiative recombination of the UVB LED of Fig. 2 before (a) and after (b) 42 h operation.



TEAM

Integrated Quantum Technology



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, with operation in the field as well as in space. FBH research currently focuses on the following topics:

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 ebnet, sodass die QT ihr Potenzial für die Gesellschaft von morgen entfalten kann. Zu den adressierten Anwendungen zählen die Quantensorik, die Quantenkommunikation und das Quanten-Computing – außerhalb des Labors im Feld ebenso wie im Weltraum. Aktuell setzen wir am FBH die folgenden Schwerpunkte:

- > **Quantum photonic components** – development of electro-optical components and hybrid micro-integrated modules providing 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, catching, and manipulating light on 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.

- > **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. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Lasern mit schmalbandiger und ultra-schmalbandiger 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.



Fig 1. FBH laser modules are currently developed which are suited for experiments on the International Space Station ISS.

Laser modules for basic research on the International Space Station

Quantum photonics is one of the most exciting research areas for future applications, such as quantum cryptography and quantum computing, but also for fundamental physical experiments. To investigate the interaction between light and matter under weightlessness, the German and US-American space agencies have launched the project Bose-Einstein Condensates Cold Atom Laboratory (BECCAL) on board the International Space Station ISS (Fig. 1). The BECCAL apparatus is expected to enable multiple options for magnetic and optical trapping of rubidium and potassium atoms, as well as different methods for coherent manipulation. It will also offer new perspectives for experiments on quantum optics, atom optics, and atom interferometry in the unique microgravity environment on board the ISS [1].

In the Joint Lab Quantum Photonics, we currently realize laser modules emitting at 767 nm for cooling of potassium (K), 780 nm for rubidium (Rb), 1064 nm for manipulating the trapped atoms with 'optical tweezers' in an optical dipole trap, and 764 nm for

further cooling and condensing the atoms in a 'blue detuned' optical trap. So far, such experiments involving FBH lasers have been carried out in drop towers and on sounding rockets, thus limited by the time of free fall ranging from a few seconds up to several minutes. Experiments of the next generation on the ISS are planned for three years with an accumulated operational time of 10,000 hours. The equipment therefore has to operate reliably and failure-free during the entire duration of the mission.

The modules each contain an extended-cavity diode laser (ECDL) with a wavelength-stabilized Bragg grating and a ridge-waveguide (RW) laser diode. The ECDL is followed by an optical isolator and an RW optical amplifier (RWA) that is tilted towards the facets (Fig. 2) to suppress optical feedback. Fig. 3 (left) indicates the light-current curve and the optical spectrum (inset) of a 1064 nm RWA at optical powers up to $P = 0.9\text{W}$ seeded at 16 mW. An optical output power of $P_{\text{out}} = 0.5\text{W}$ is specified for the 1064 nm module. For qualification of the RWA, identically

designed RW laser diodes (RWL) were realized based on the same materials and processes as the RWA. The facet reflectivities of the RWL were chosen to reach virtually the same power density in the RWL as in the RWA.

Degradation of laser facets by absorption of light is a major failure mechanism in laser diodes. In order to suppress degradation an improved process was applied. The laser bars were cleaved in ultra-high vacuum (UHV), and single-crystalline ZnSe was deposited onto the cleaved facets in the same UHV environment. We performed accelerated life tests of passivated 1064 nm RWLs for 5,000 hours at the highest power level of $P_{\text{ac}} = 1.5\text{W}$ that could be applied. In Fig. 3 (right) the life test plot for qualification of a process lot of 1064 nm RWLs is shown. The drive current at constant power P_{ac} is plotted against the accelerated time. Acceleration was derived using the standard method [2] with the stress proportional to the n^{th} power of optical power and thermal activation with typical energy E_A . The acceleration parameters were $n = 5.5$ and $E_A = 0.8\text{eV}$, derived from lot-wise life-testing at different temperatures and optical powers. Following the model of scale-accelerated aging, the mean time to failure exceeds 100 years, meeting the requirement for high reliability $R > 99\%$ at $P_{\text{out}} = 0.5\text{W}$ over the full mission time. The qualification of the amplifiers for 764 nm, 767 nm, and 780 nm is planned for 2023.

This work is supported by the German Space Agency (DLR) with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under grants no. 50WP1704 and 50WP2104. Further funding was provided by VDI Technologiezentrum GmbH through the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under grant no. 13N14906.

Die deutschen und US-amerikanischen Weltraumagenturen planen zukunftsweisende Experimente mit kalten Atomen auf der Internationalen Raumstation ISS. Das Bose-Einstein Condensates Cold Atom Laboratory (BECCAL) soll neue Erkenntnisse für die Grundlagenphysik liefern und zukünftige Anwendungen im Bereich der Quanten-Photonik ermöglichen.

Für die geplanten Langzeitexperimente unter Schwerelosigkeit müssen die dafür benötigten Geräte über 10.000 Stunden fehlerfrei arbeiten. Wir liefern die zugehörigen Lasermodule mit schmaler Linienbreite und Lichtwellenlängen von 764 nm, 767 nm, 780 nm und 1064 nm für Experimente an Kalium und Rubidium. Um die Zuverlässigkeit dieser Module zu sichern, haben wir unsere Prozesstechnologie weiter optimiert. Durch entscheidende Fortschritte konnten wir die dominante Fehlerursache von Facettendegradation unterdrücken. Dadurch ist zu erwarten, dass die Module über die gesamte Testzeit zuverlässig laufen werden. Der Nachweis wurde für die 1064 nm Module bereits erbracht; die Qualifizierung für die weiteren Wellenlängen folgt in diesem Jahr.

Publications

[1] K. Frye, S. Abend, W. Bartosch, et al., "The Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory", EPJ Quantum Technol. 8, 1, <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-020-00090-8> (2021).

[2] K. Häusler, A. Bawamia, J. Boschker, J. Baumann, J. Fricke, A. Maaßdorf, A. Knigge, A. Wicht, "Operational Lifetime Qualification of Laser Diodes for BECCAL", ICSS 2022, SPIE Digital Library (2022).

[3] J.E. Boschker, U. Spengler, P. Ressel, M. Schmidbauer, A. Mogilatenko, "Stability of ZnSe-passivated laser facets cleaved in air and in ultra-high vacuum", IEEE Photonics Journal 14 (3), 1-6 (2022).

[4] K. Häusler, A. Bawamia, J. Baumann, H. Wenzel, A. Maaßdorf, J. Fricke, J. E. Boschker, J. Glaab, A. Knigge, A. Wicht, G. Tränkle, "Improvement of Lifetime of Semiconductor Optical Amplifiers for BECCAL", Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA (2023).

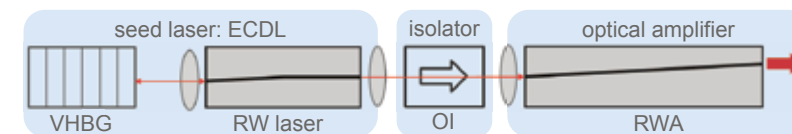


Fig 2. Schematic sketch of an Extended Cavity Diode Laser.

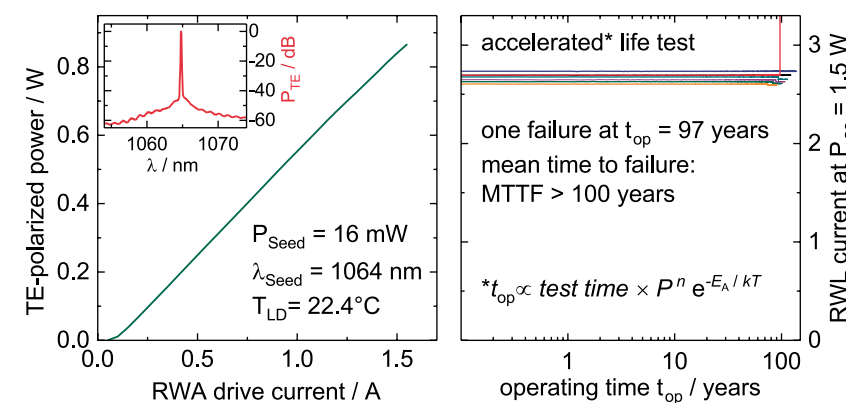


Fig 3. Characteristics of the RWA and life test of RWLs under high stress.



Fig. 1. Next-generation ECDL-MOPA laser module.

Next-generation ECDL-MOPA laser modules for potassium spectroscopy – paving the way for industrial applications

Quantum sensors like atom interferometers and optical clocks surpass classical devices in terms of precision and accuracy. Therefore, they enable to improve applications in fields such as inertial navigation, geodesy, geophysics, and earth observation as well as in high-speed trading. Developments from photonics, laser technology, and optics have paved the way for advanced solutions in quantum technology (QT) and have made significant strides in bringing QT to the market. However, exploiting the full potential of these products remains a challenge that requires a comprehensive understanding of both quantum and classical technologies.

Laser requirements are typically stated in terms of wavelength, linewidth, optical power, and system lifetime/robustness. Yet,

the adjustable parameters of commercially available laser systems usually have no direct and simple mapping to user-accessible specifications. To augment laser technology, an integrated solution is needed that supports users, eases the workload, accelerates operation, requires less attention, and reduces the demand for experienced operators. As part of an integrated solution, we have developed a high-power, narrow-linewidth laser module operating at a wavelength of 767 nm. It was specifically designed for the QT application of manipulating neutral, ultra-cold potassium atoms in an atom interferometer setup.

This next-generation laser module is based on the extended cavity diode laser (ECDL) master oscillator power amplifier (MOPA) concept, as shown in Fig. 1. It allows users to independently tune

optical output power and emission frequency, giving them an additional degree of freedom to choose parameters according to the particular requirements of the application. This laser module provides a PM-fiber coupled optical output power of up to 375 mW by tuning the injection current of the power amplifier chip. A coarse tunability of the frequency of more than ± 15 GHz, as shown in Fig. 2, is possible by varying the temperature of the frequency-selective volume holographic Bragg grating. The frequency can be fine-tuned in an interval of ± 2 GHz without any mode-hops by changing the injection current of the ECDL chip, as shown in Fig. 3. The laser module exhibits a narrow FWHM linewidth of 179 kHz at 1 ms timescales. This ensures high precision in the measurement of the atomic transition being spectroscopically investigated.

Our latest laser modules incorporate advanced functionalities, which eases using them in complex experiments to attain the optimum result. Numerous temperature sensors distributed among the micro-optical bench allow the user to detect external environmental disturbances and stabilize the optical resonator length or rather the optical emission frequency. Tuning the wavelength of the laser emission beyond the free spectral range of the laser was accomplished. This is possible by simultaneously changing the center frequency of the frequency-selective element by means of its temperature and the optical resonator length by means of the ECDL injection current or the temperature of either ECDL chip or micro-optical bench. An intra-cavity pick-off point enables the spectroscopy of the Bragg grating and thereby allows synchronous tuning without mode-hops. Characterization of the laser module in the atom interferometer experiment is planned for 2023.

This work was supported by the European Regional Development Fund (ERDF) of the European Union and administrated by the Investitionsbank Berlin within the Program to Promote Research, Innovation, and Technologies (ProFIT) under grant no. 10168115 and by the VDI Technologiezentrum GmbH with funds provided by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under grant nos. 13N14906 and 13N15724.

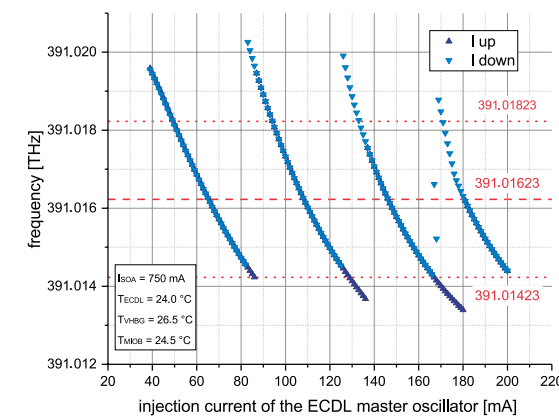


Fig. 3. Laser emission frequency as a function of the injection current of the ECDL master oscillator chip.

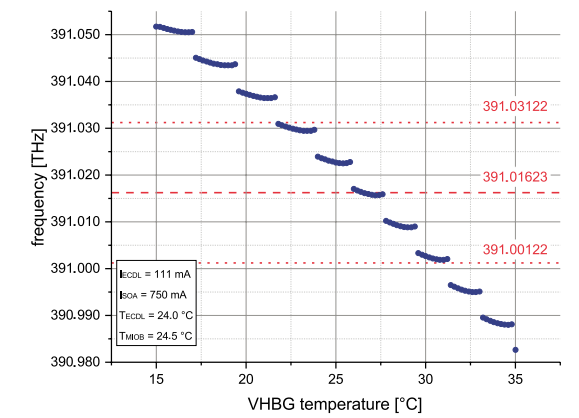


Fig. 2. Laser emission frequency as a function of the VHBG temperature

Für ein Experiment mit ultrakalten Kaliumatomen in einem Atominterferometer haben wir ein Lasermodul entwickelt, das eine hohe Ausgangsleistung mit schmaler Linienbreite liefert. Als Teil einer integrierten Lösung soll dieses Modul die Arbeitsbelastung von Anwendern reduzieren, den Betrieb beschleunigen und ohne Expertenwissen genutzt werden können. Dadurch eignet es sich auch für Messungen in industriellen Anwendungen, die höchste Präzision erfordern.

Für die Anwendung in der Atominterferometrie ist eine Ausgangsleistung von 300 mW und eine Durchstimmbarkeit der Emissionsfrequenz über viele GHz erforderlich. Unser ECDL-MOPA-Lasermodul liefert eine fasergekoppelte Ausgangsleistung von bis zu 375 mW. Es ermöglicht eine grobe Durchstimmbarkeit von über ± 15 GHz und eine feine Durchstimmbarkeit ohne Modensprünge von ± 2 GHz – dazu variieren wir die Bragg-Gitter-Temperatur beziehungsweise den ECDL-Injektionsstrom. Durch eine synchrone Verstimmung beider Aktuatoren ist es uns gelungen, die feine Durchstimmbarkeit über den freien Spektralbereich hinaus zu erweitern. Eine schmale FWHM-Linienbreite von 179 kHz bei Zeitskalen von 1 ms sorgt für eine hohe Präzision beim Messen des zu spektroskopierenden atomaren Übergangs.

Towards a micro-integrated optically pumped magnetometer for biomedical applications

Atomic quantum sensors are based on quantum mechanical principles and utilize atomic properties to measure physical quantities with unprecedented precision and sensitivity. They are suited for a wide range of applications, such as navigation, time and temperature measurements as well as sensing of gravitational and electromagnetic fields. In our Joint Lab Integrated Quantum Sensors, we focus on the development and implementation of miniaturized quantum sensors. Our aim is to improve the performance and functionality of such devices and to push for laboratory-scale setups to be successfully used as portable probes in field applications.

One type of such atomic quantum sensors is the optically pumped magnetometer (OPM), which employs the electron spins of atomic vapors to measure the local magnetic field environment. First, the electron spins are polarized by laser light. Subsequently, they are allowed to precess in the external magnetic field. By examining the atomic spin state with laser light and exploiting magneto-

optical effects of the surrounding field on the atomic ensemble, the magnetic field can be measured.

In the MyoQuant project, we take efforts towards a portable magnetic field probe that is suitable for magnetomyography (MMG) to measure human muscle activity in a non-invasive way. The magnetic fields generated by electrical pulses during muscle contraction are typically very weak and trigger at a few kHz. To render the sensor applicable in the medical field, sensitivity needs to reach the sub-pT regime.

Our laboratory setup shown in Fig. 1 serves as a test bed to investigate the implementation of several OPM techniques and effects. This is intended to increase the sensitivity of a working magnetometer as well as to benchmark critical components. Here, a DBR laser is locked to a D1 hyperfine transition of cesium via saturated absorption spectroscopy. The frequency-stabilized laser beam is transmitted through the heated vapor cell

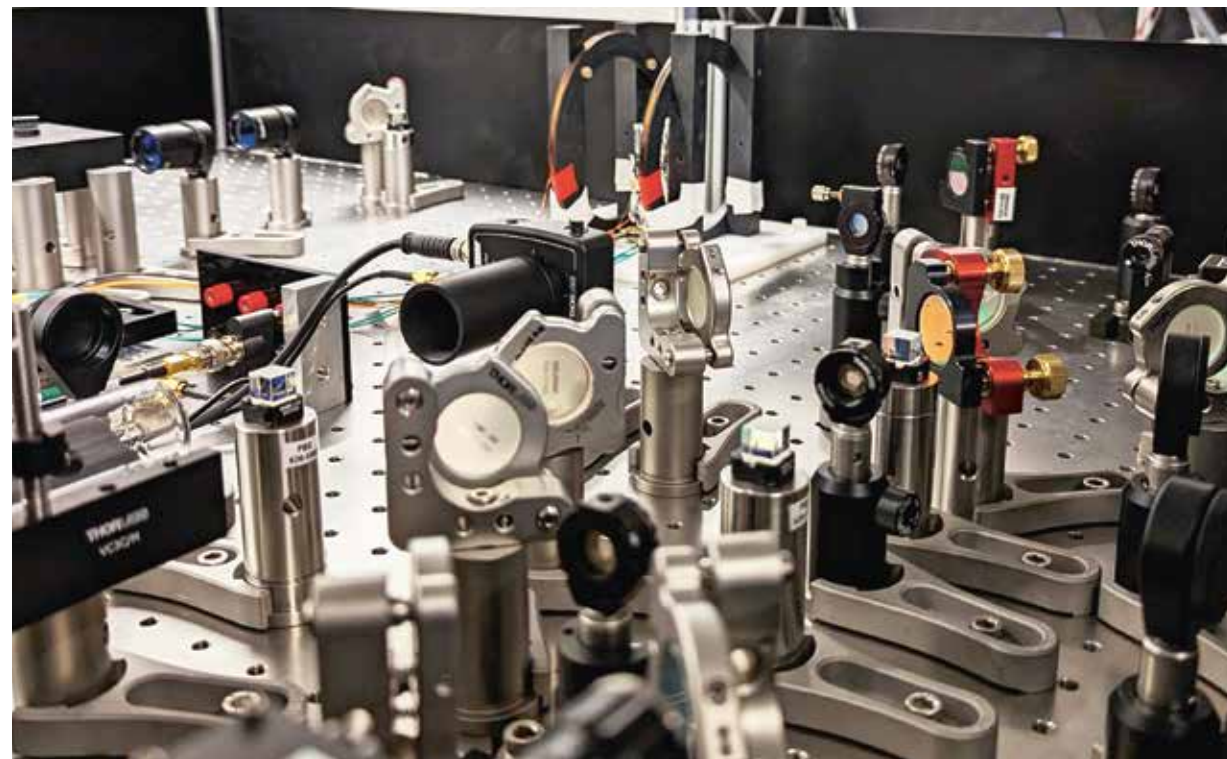


Fig. 1. Tabletop setup of an OPM to investigate different OPM techniques and benchmarking components and subsystems.

where it interacts with vaporized cesium atoms. The cell is additionally placed inside a coil system to control and manipulate the ambient magnetic field. The transmitted laser beam is split into its horizontal and vertical polarization components and finally detected on a balanced polarization-dependent detector. In this configuration, we currently achieve sensitivities of about $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ as indicated by the red line in Fig. 2. This property is to be enhanced by heating the vapor to an optimal temperature of about $70 \text{ }^\circ\text{C}$ and modulating the pump and probe beam to decouple the detected signal from environmental noise.

Further progression based on the current state of the project is to develop and implement a miniaturized sensor head. A CAD view of a first concept for a micro-integrated field probe is shown in Fig. 3. The optical and electrical components of the sensor head are to be assembled on a 3D printed ceramics bench with an overall volume of 2.8 cm^3 . Subsystems are connected via electrical and optical interfaces. Once the prototype sensor is assembled, it will be applied to a muscle phantom in a magnetically shielded environment. Additionally, instead of glass-blown cells, further iterations of the prototype will employ in-house fabricated MEMS vapor cells. Deep reactive-ion etching and anodic bonding techniques are currently being optimized to achieve wafer-level MEMS cell production volumes.

This work is supported by the German Space Agency DLR with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under grant number DLR 50WM2169.

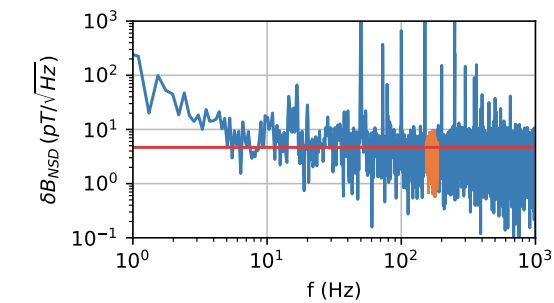


Fig. 2. Spectrum of the magnetic field noise density (blue) of the laboratory-scale OPM setup. The orange segment was used to estimate the white noise floor (red) at $4.67 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ in the $100 - 200 \text{ Hz}$ frequency band.

Publication

S. Neinert, V. Lebedev, S. Hartwig, K. Vardhan, M. Jutisz, M. Gündogan, M. Christ, J. Marquetand, P.J. Broser, T. Middelmann, M. Krutzik, "Towards an optically pumped magnetometer for biomagnetism in space", presented at 10th workshop on optically pumped magnetometers (WOPM), Birmingham, UK (2022).

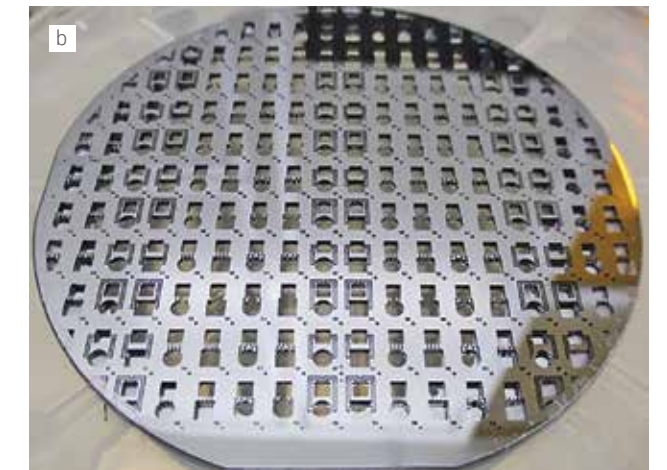
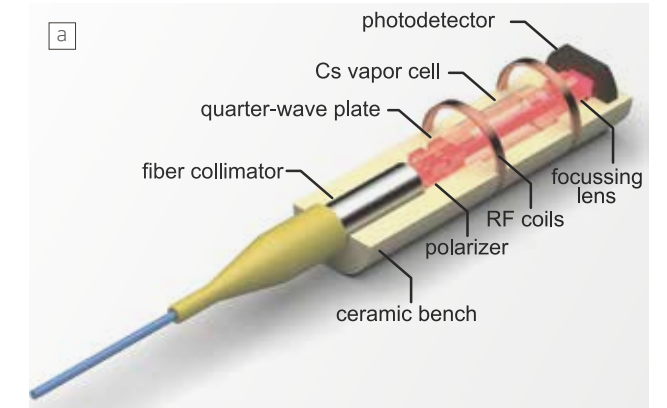


Fig. 3. (a) CAD of a prototype micro-integrated OPM for medical field application. (b) Sample of a 1 mm thick $4''$ silicon wafer, processed by deep reactive-ion etching.

Atomare Quantensensoren nutzen quantenmechanische Prinzipien und atomare Eigenschaften, um physikalische Größen mit höchster Präzision und Genauigkeit zu messen. Im Joint Lab Integrated Quantum Sensors entwickeln wir miniaturisierte Quantensensoren mit immer höherer Leistung und Funktionalität. Unser Ziel ist es, funktionsfähige Laboraufbauten als tragbare Messgeräte für den Feldeinsatz zu etablieren. Ein solcher Sensortyp ist das optisch gepumpte Magnetometer (OPM), das die Elektronenspins von Gasatomen nutzt, um lokale Magnetfelder zu messen. Im MyoQuant-Projekt arbeiten wir an einem tragbaren Magnetfeldsensor für die Magnetomyographie (MMG). Damit lässt sich die menschliche Muskelaktivität nicht-invasiv messen. Mit unserem Laboraufbau erreichen wir derzeit Sensitivitäten von bis zu $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Im nächsten Schritt entwickeln wir den Prototyp eines mikrointegrierten Sensors, um ihn in magnetisch geschirmter Umgebung an einem Muskelphantom zu testen.

Deterministic creation and engineering of quantum emitters in silicon carbide

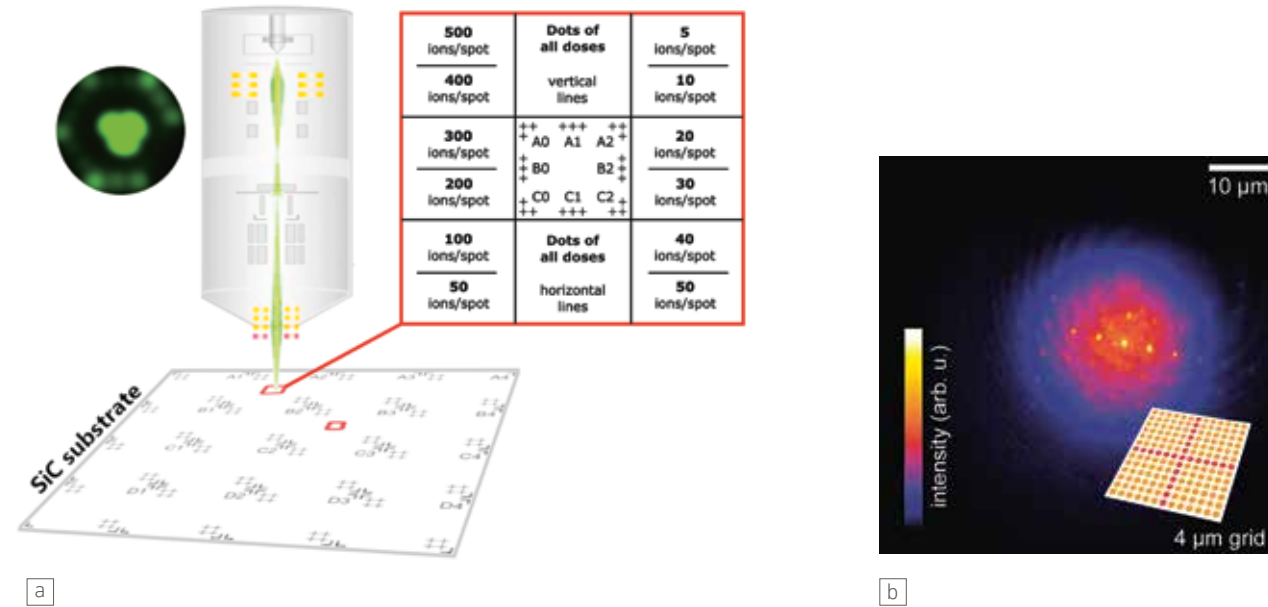


Fig. 1. Defect creation in 4H-SiC. (a) Patterns for focused He ion irradiation of different doses are placed onto the sample (red squares). (b) The wide-field image of the orange square region of the pattern in (a) reveals fluorescent spots. Inset: blow-up of the pattern with a 4 μm grid, where red marker dots (1000 ions) separate the target dose regions (here 200 and 300 ions per dot).

In the field of photonic quantum technologies, several materials have emerged as promising candidates to host quantum emitters. CMOS-compatible silicon carbide (SiC), originally known from high-power applications, appears to be particularly attractive. It combines technological maturity with a large transparency window and the availability of tunable color centers with excellent optical and spin properties.

To achieve an optimal spectral and spatial overlap of quantum emission with an optical mode in a photonic chip architecture, the deterministic generation of defects at specific target locations is crucial. Here, mask-less direct write techniques using focused ion beams stand out since quantum emitters can potentially be created within prefabricated photonic components. Helium ions are particularly well-suited as they are light and thus cause less surface damage. We employ a helium (He) ion microscope at HZB, in which an ultimately sharp tip consisting of three atoms (Fig. 1) is used to ionize He in the gas-phase by high electric fields. Only one of the atom's emission beamlets is directed through the aperture, resulting in a virtual source size of less than 3 Å and spot sizes of < 1 nm on the sample. The beam is controlled by a patterning engine with the beam path and parame-

ters optimized by our Python toolbox FIB-o-mat[1]. Fig. 1(a) depicts a corresponding pattern with markers and dot arrays of well-defined ion doses placed onto a marked 4H-SiC sample. We aim to create negatively charged silicon vacancies V_{Si} with zero phonon lines (ZPL) of 862 nm (V_1), 858.2 nm (V_1') and 917 nm (V_2), depending on the specific lattice side location. Owing to its electronic levels deep in the bandgap, V_{Si} acts as on-demand single photon source even at room temperature (RT).

A home-built epi-fluorescence scanning confocal microscope, as shown in Fig. 2(a), is used for optical characterization of the created fluorescent defects. The sample is mounted on a three-dimensional nanopositioning piezo stage. Wide-field imaging with an electron multiplying CCD, see Fig. 1(b) and confocal mapping as depicted in Fig. 2(b), recover the spatially well-resolved fluorescence of the patterned dot arrays. The setup works at room-temperature (RT), where the V_{Si} emission spectrum is dominated by the phonon sideband (PSB) in the range of 700–1000 nm. The characteristic ZPL of V_{Si} were measured at cryogenic temperatures in collaboration with Dr. Alberto Hernández-Mínguez (Paul-Drude-Institut) and occur selectively in the irradiated regions, proving the feasibility of our approach.

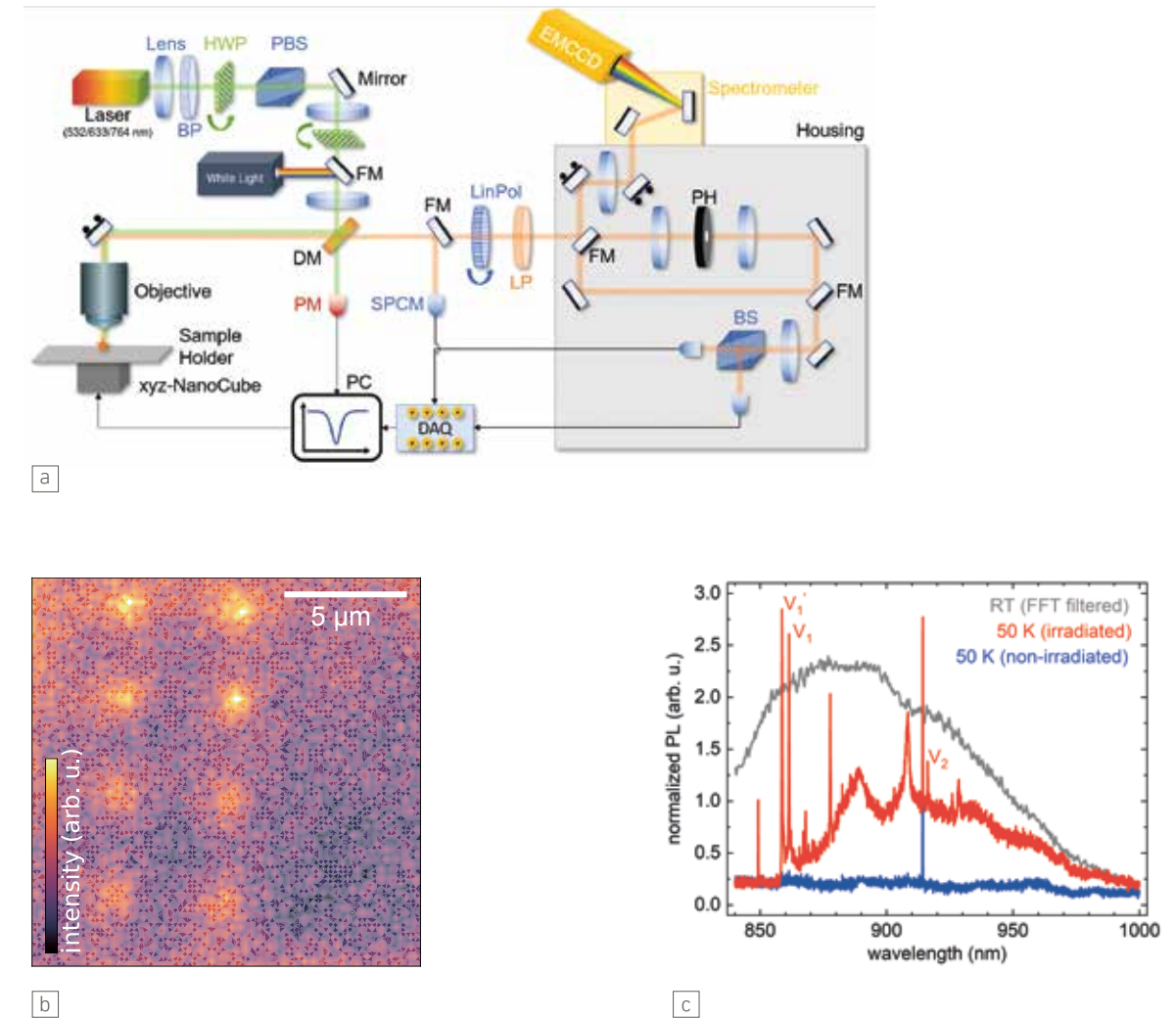


Fig. 2. Optical characterization of V_{Si} emitters in 4H-SiC. (a) Home-built epi-fluorescence scanning confocal microscope to take (b) confocal maps and (c) fluorescence emission spectra (grey line). An FFT filter was applied to the RT spectra to reduce etaloning caused by the CCD. The characteristic ZPLs are observed at low temperatures (red line) and appear only in the irradiated regions.

So far, only ensembles of V_{Si} emitters could be characterized (down to minimal doses of 200–300 ions per dot). Individual quantum emitters are expected in the range of 10–20 ions per pattern dot, but are currently hidden in the background fluorescence. Ongoing studies include annealing experiments to reduce the fluorescent background and aim at measuring the properties of the individual quantum emitters, such as saturation, polarization, and anti-bunching behavior.

This work is funded by the Leibniz Association within the framework of Collaborative Excellence between PDI Berlin, HZDR Dresden and FBH Berlin under grant no. K335/2020. Defect creation based on focused He ion beam patterning was done at the CoreLab Correlative Microscopy and Spectroscopy of HZB Berlin.

Publication

V. Deinhart, L.-M. Kern, J.N. Kirchof, S. Juergensen, J. Sturm, E. Krauss, T. Feichtner, S. Kovalchuk, M. Schneider, D. Engel, B. Pfau, B. Hecht, K.I. Bolotin, S. Reich, K. Höflich, "The patterning toolbox FIB-o-mat: Exploiting the full potential of focused helium ions for nanofabrication", Beilstein J. Nanotechnol., vol. 12, pp. 304-318, doi:10.3762/bjnano.12.25 (2021).

Nicht-klassische Lichtquellen, insbesondere solche, die einzelne Photonen auf Abruf (on-demand) erzeugen, sind unentbehrlich für Chip-basierte photonische Quantentechnologien. Unter den möglichen Realisierungen von Quantenemittern sind Defekte in Materialien mit großer Bandlücke, sogenannte Farbzentren, besonders vielversprechend. Unser Fokus liegt dabei auf der negativ geladenen Si-Fehlstelle (V_{Si}) in Siliziumkarbid. Diese verbindet Einzelphotonenemission bei Raumtemperatur mit einer Materialplattform von hoher technologischer Reife und vorteilhaften optischen Eigenschaften. V_{Si} können unter anderem durch Beschuss mit leichten Ionen erzeugt werden. Wir verwenden ein Helium-Ionen-Mikroskop. Dessen Strahlfokus von unter 1 nm erlaubt es, komplexe Muster mit lokal variierender Dosisleistung zu erzeugen. Messungen der Fotolumineszenz bei tiefen Temperaturen belegen die charakteristischen Emissionslinien der erzeugten V_{Si} -Ensembles. In unseren laufenden Forschungsarbeiten konzentrieren wir uns nun darauf, auch einzelne Quantenemitter deterministisch zu erzeugen und nachzuweisen.

Fabrication of suspended photonic crystal cavities in diamond

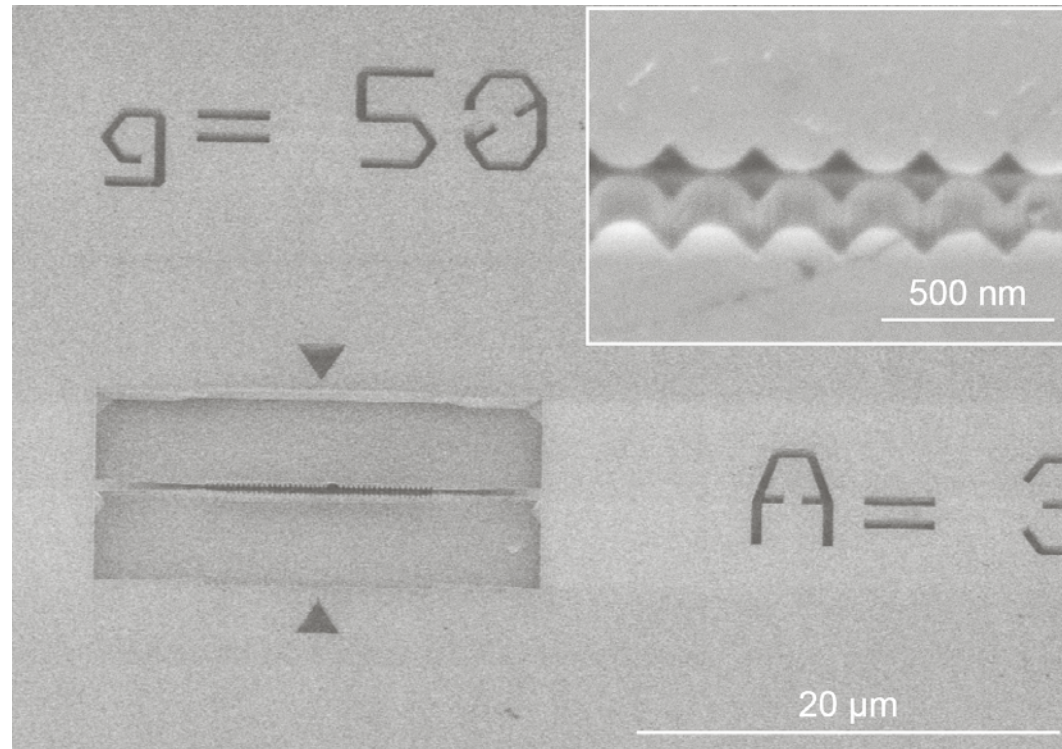


Fig. 1. Scanning electron micrograph of a suspended cavity. The nanostructure is about 20 μm long and 275 nm thick. Inset: closed-up view of one cavity, showing the periodic modulation of its width.

Photonic crystal cavities are devices formed by periodic modulation of the refractive index of a dielectric material. These devices can be engineered to confine light at a specific wavelength, which corresponds inversely to the resonance frequency of the cavity. When an optical quantum system is placed inside the cavity, its resonant coupling with the electromagnetic field is enhanced. Photonic crystal cavities have therefore been used to study the interaction between light and matter, but nowadays these devices are becoming more and more relevant for the development of quantum networks. This is due to their strong light-matter interaction, which makes them an efficient interface between stationary quantum systems and photons.

In our Joint Lab Diamond Nanophotonics, we are developing processes to fabricate a new design of photonic crystal cavities proposed by our collaborators at Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin). This type of cavity requires full suspension from the substrate to trap light inside. This task, however, is very challenging as diamond cannot be grown single crystalline in thin films of several hundred nanometers.

We have now succeeded in fabricating suspended nanostructures in diamond. The devices were first patterned in our cleanroom by electron beam lithography and then etched into a silicon nitride hard mask using an inductively coupled plasma (ICP) etching process. An anisotropic O_2 -plasma etching was employed to transfer the pattern into the diamond substrate. Additional 200 nm of silicon nitride was then conformally deposited on the sample to protect the sidewalls of the devices. The aforementioned anisotropic etching processes were finally employed again to etch through the hard mask and further expose the diamond at the bottom of the cavities. The nanostructures were released at this point by employing an O_2 -plasma generated with no bias. In such a configuration, the particles in the plasma are not accelerated towards the bottom of the reactor chamber, but rather move in all directions inside it. The resulting etching rates are therefore only limited by the different reactivities of the diamond crystallographic planes. For example, vertical etching rates are here smaller than horizontal ones. Such a quasi-isotropic etching process was used to dissolve the bottom of nanostructures and a full suspension was achieved. Finally, the silicon nitride hard mask was selectively removed

to expose the diamond surface. Fig. 1 shows an example of the fabricated devices. In the inset, a close-up SEM illustrates the periodic modulation of the width of the nanostructure, which forms the optical trapping potential in this device.

The samples were then characterized in the optical laboratories of the Integrated Quantum Photonics group at HU Berlin, where emission spectra from the fabricated devices were collected at room and cryogenic temperatures. Fig. 2 shows an example of such a spectrum, where the sharp peak of the cavity resonance mode is visible on top of the broad emission from the phonon side band of the nitrogen-vacancy defect centers present in the diamond substrate. A Lorentzian fit of the peak allows to evaluate the quality Q-factors of the fabricated devices. Fig. 3 reports a histogram of all the calculated values, showing that the distribution has an average Q of 1611, with a standard deviation of 517. Further development and optimization of the fabrication techniques are still ongoing to reliably produce suspended photonics crystal cavity with high quality factors.

These results were realized within the projects "Diamant-Nanophotonik für On-Chip Quantentechnologien" (DiNOQuant, project number 13N14921), "Photonisch-Integrierter Quantencomputer" (QPIC-1, 13N15858), "Quanten-Photonisch Integrierter Skalierbarer Speicher" (QPIS, 16KISQ032K) and supported by the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF).

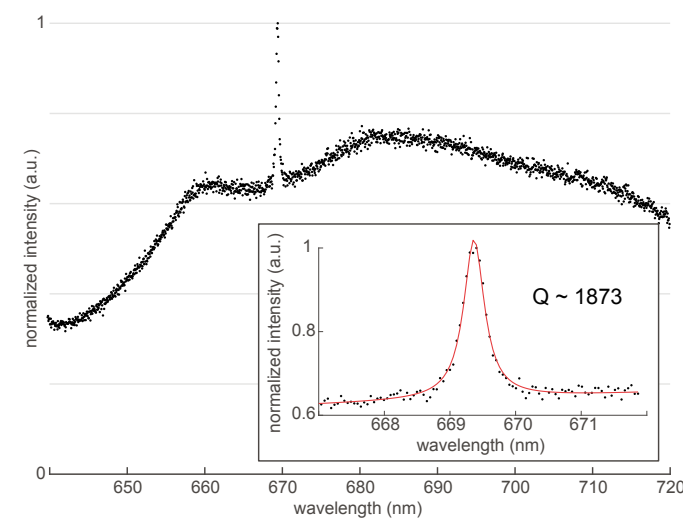


Fig. 2. Spectrum of one of the fabricated cavities at room temperature. The inset shows the spectral range of the cavity mode. From a Lorentzian fit of the data (red line), we evaluated a Q-factor of about 1873.

Photonische Kristallresonatoren sind künstliche dielektrische Materialien, die durch periodische Modulation des Brechungsindex entstehen. Sie können so designt werden, dass sie Licht bei bestimmten Wellenlängen „einfangen“. Befindet sich ein optisches Quantensystem im Modenmaximum des Resonators, koppelt es stärker mit dem elektromagnetischen Feld. Derartige funktionale Elemente können als effiziente Schnittstelle zwischen stationären Quantensystemen und Photonen eingesetzt werden, um Quantennetzwerke zu entwickeln.

Im Joint Lab Diamond Nanophotonics haben wir erfolgreich einen neuartigen photonischen Kristallresonator hergestellt. Er basiert auf einem Design, das im Joint Lab zusammen mit der Humboldt-Universität zu Berlin entworfen wurde. Das Design erlaubt es, 99% des Lichts aus dem Resonator in einen Wellenleiter zu koppeln. Die Herstellung ist mit einem quasi-isotropen Plasmaätzprozess am FBH gelungen. Die aufgezeichneten Emissionsspektren der hergestellten Geräte bestätigten, dass Resonatorresonanzen vorhanden sind und somit die erfolgreiche Nanofabrikation.

Publication

J. M. Bopp, M. Plock, T. Turan, G. Pieplow, S. Burger, T. Schröder, "Sawfish" Photonic Crystal Cavity for Near-Unity Emitter-to-Fiber Interfacing in Quantum Network Applications", arXiv:2210.04702 (2022).

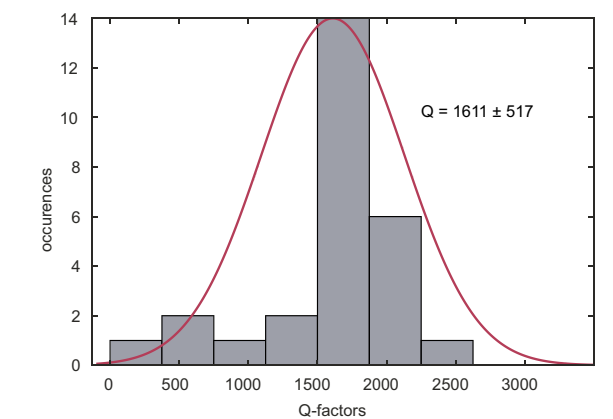


Fig. 3. Histogram of the calculated values of Q-factors from the analyzed cavities. The distribution has a mean value of 1611 and a standard deviation of 517.



TEAM III-V Electronics



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 fast 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:

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 CO₂-Fußabdrucks der Systeme. Alle Aktivitäten basieren auf der III/V-Halbleitertechnologie. Sie umfassen derzeit hauptsächlich die folgenden Themen:

- > **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).
 - > **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 to 300 GHz (5G/6G). The target is the complete digitization.
 - > **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 semiconductor for these developments.
 - > **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-bandgap materials**, such as AlN and Ga₂O₃ – 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.

- > **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).
 - > **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). Langfristiges Ziel ist der komplett digitale Transmitter.
 - > **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 die GaN-Technologie.
 - > **Laterale und vertikale GaN-basierte Schalttransistoren & Schottkydioden 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 Ga₂O₃ – 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.

An integrated HBT and p-n-diode MMIC process for mm-wave applications

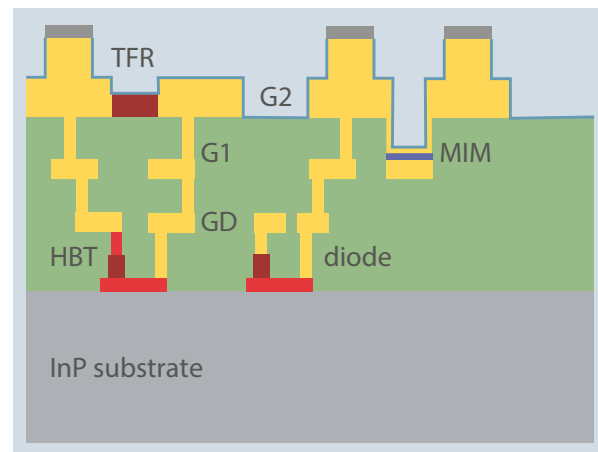


Fig. 1. MMIC layer stack showing the bipolar transistor and the p-n diode.

The development of THz systems and components has been driven by a recent surge in demand for high-speed communication links, components for the internet of things, and sensor applications. To accommodate the higher bitrate required for these applications, new compound semiconductor technologies such as InP HBTs have emerged. Due to their superior material properties, when compared to silicon, InP-based devices yield higher transit and maximum oscillation frequencies with higher operating voltages. This translates to circuits and systems with higher operating frequencies and superior power ratings, helping to transfer higher bitrates over larger distances with minimized data loss.

We offer our own InP MMIC process at FBH based on a triple mesa process. This process utilizes i-line lithography to fabricate InP HBT-based circuits. The MMIC stack offers three metallization

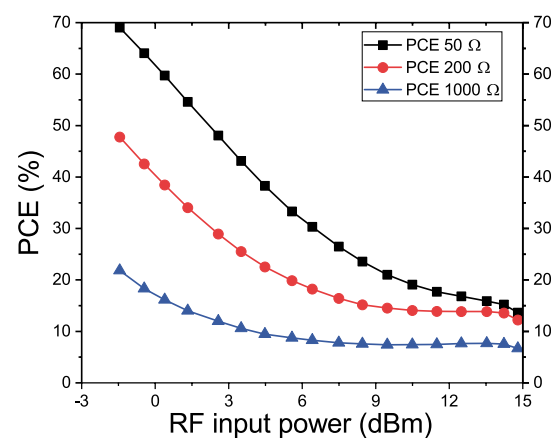


Fig. 2. Measured PCE vs. RF input power at the DUT for a R_{load} of 50 Ω , 200 Ω and 1 k Ω ; input signal frequency: 108 GHz.

layers with integrated MIM capacitors and NiCr thin-film resistors. The process also utilizes the bipolar nature of the InP HBT epitaxial stack to realize both bipolar transistors as well as p-n diodes. Without any extra processing steps, the two active device flavors can be processed side-by-side as indicated in Fig. 1. This bipolar behavior allows to integrate diodes and transistors into high-speed circuits and systems.

We have already realized such circuits in the form of a highly efficient W-band single-diode rectifier MMIC, using our InP HBT technology. The circuit contains a $2 \times (0.85 \times 6) \mu\text{m}^2$ p-n diode as core element for rectification and a shunted 3 pF capacitor. The rectifier achieves a maximum power conversion efficiency (PCE) of 69% at 108 GHz with a load resistance of 50 Ω and an 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. 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.

Alongside this diode rectifier, we have also realized an InP HBT-based amplifier. The circuit was designed using a common emitter (CE) single finger 850 nm transistor with separate bias pads for base and collector. The input and output are 50 Ω matched to a thin-film microstrip stack. The chip photograph of the realized PA is depicted in Fig. 3. The chip area is $0.7 \times 0.75 \text{ mm}^2$. The large signal measurement shows a gain of 6 dB and the measured input 1-dB gain compression at 3 dBm input power. A saturated output power of 12.5 dBm is achieved with 45 mW DC power consumption and results in a power-added efficiency (PAE) of 17% at 87 GHz. The chip also offers flip-chip indium/gold pillars, which enable flip-chip integration to larger CMOS or BiCMOS circuits and/or systems. The pad frame of the circuit offers mechanical stability as well as a thermal path for the flip-chip process.

The flexibility of our MMIC process with different active components processed in parallel covers a broad spectrum of circuit concepts. With its short runtime, innovative circuits and systems in the THz regime can be realized. This work was financed through the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) project T-KOS (no. 16KIS1405) and the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) initiative (no. 16FMD02).

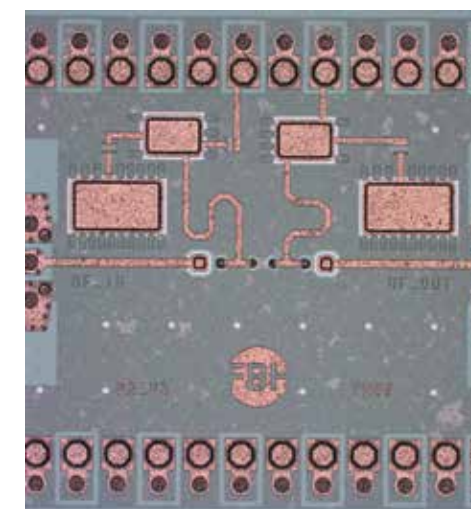
Unser InP-basierter MMIC-Prozess ermöglicht es, bipolare Transistoren und p-n-Dioden als aktive Bauteile in einer Schaltung zu verwenden. Dadurch lassen sich innovative Schaltungskonzepte für Anwendungsbereiche wie Kommunikation oder Energiegewinnung im Sub-THz- und THz-Frequenzbereich umsetzen. Unter anderem haben wir mit diesem Prozess eine Gleichrichterschaltung und einen Leistungsverstärker realisiert. Die Gleichrichterschaltung bietet eine effiziente Leistungswandlung von 69% bei 108 GHz. Sie basiert auf Doppelfinger p-n-Dioden und einem 3 pF-Kondensator. Der Leistungsverstärker erreicht eine Ausgangsleistung von 12,5 dBm bei 87 GHz – bei einem sehr kompakten Layout von $0,7 \text{ mm} \times 0,75 \text{ mm}$. Eine Flip-Chip-Heterointegration mit CMOS- und BiCMOS-Schaltungen ist durch sehr kleine Indium-/Gold-Bumps möglich.

Publications

M. Rausch, T. Flisgen, C. Stölmacker, A. Stranz, A. Thies, R. Doerner, H. Yacoub, W. Heinrich, "Technology for the Heterointegration of InP DHTB Chiplets on a SiGe BiCMOS Chip for mm-wave MMICs", Proc. 52nd European Microwave Conference, Italy, ISBN: 978-2-8748-7069-9, pp. 28-31 (2022).

A. Wentzel, H. Yacoub, T. K. Johansen, W. Heinrich, V. Krozer, "A Highly Efficient W-Band Rectifier MMIC in InP HBT Technology", 17th European Microwave Integrated Circuits Conference, Italy, ISBN: 978-2-87487-070-5, pp. 208-211 (2022).

a



b

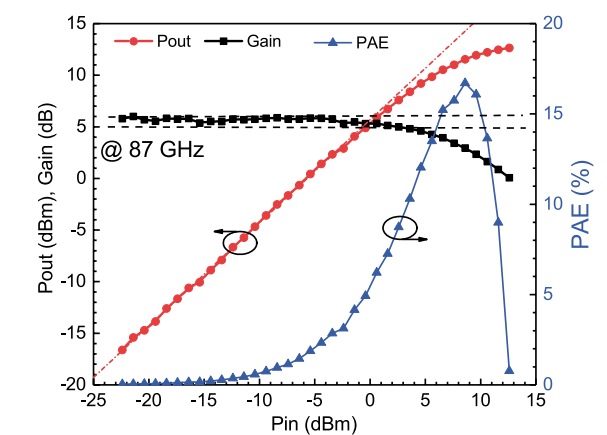


Fig. 3. (a) Microscope image of the PA. (b) Large signal measurements of the PA at 87 GHz.

Heterointegration of InP-on-BiCMOS enabling transitions up to 325 GHz

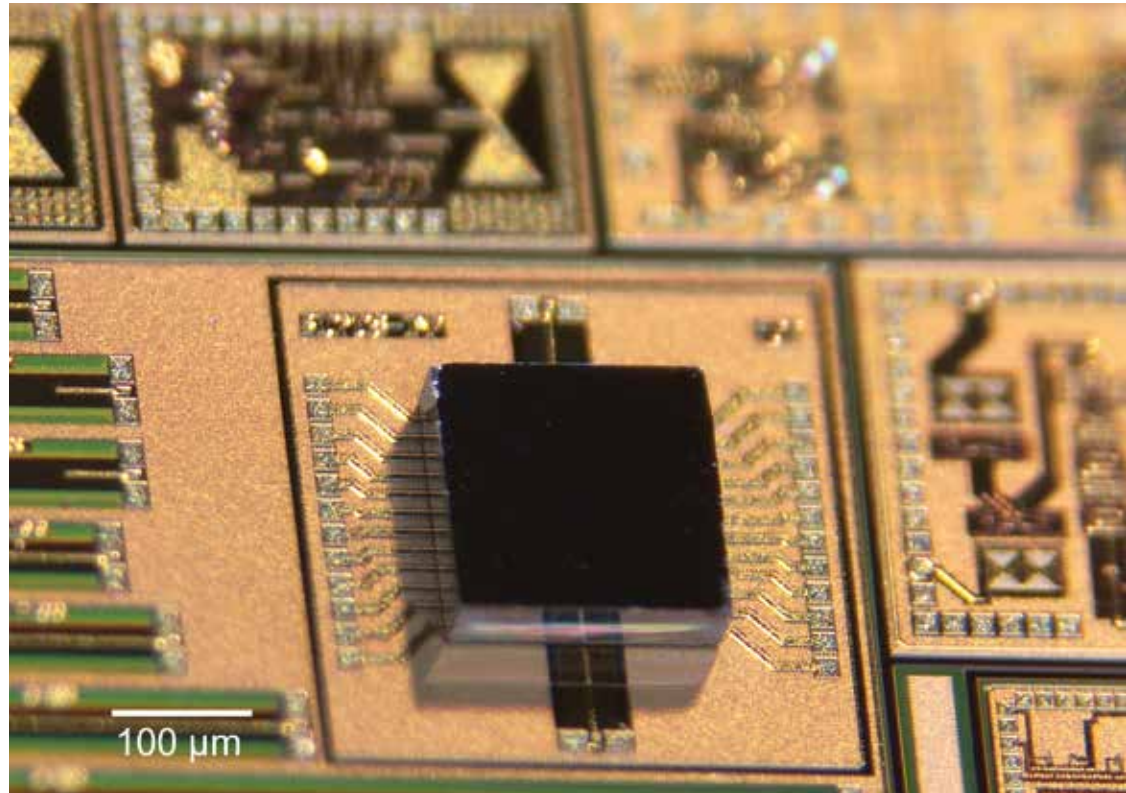


Fig. 1. InP chiplet hetero integrated on BiCMOS.

High-speed wireless and optical communication, such as 6G as well as THz sensing and imaging applications, are currently driving the development of mm-wave monolithic microwave integrated circuits (MMICs). Such applications often require relatively high output power and energy efficiency at frequencies well above 100 GHz. This is where standard Si-based CMOS technologies reach their physical limits. Therefore, other technologies, such as indium phosphide (InP) hetero-bipolar (HBT), and high electron mobility (HEMT) transistors, silicon germanium (SiGe), and even gallium nitride (GaN) HEMTs with their individual strengths, are proving interesting. However, even these technologies have their weaknesses, making heterointegration techniques pivotal for low-loss RF interconnects between III-V-based technologies and CMOS as well as BiCMOS technologies. This allows the respective technology advantages to be exploited without compromising system complexity.

For this purpose, we chose a flip-chip approach with our InP chiplets on BiCMOS chips from Leibniz IHP (Fig. 1). The intercon-

nection is realized via low-melting indium soldering, since temperatures > 200 °C are to be avoided due to the InP technology. $4 \mu\text{m}$ Au pillars for a defined distance between InP chiplet and BiCMOS chip with an approximately $2 \mu\text{m}$ thin indium cap, which later serves as a contact layer, are applied to the InP chiplets (Fig. 2). Using a die bonder, these chiplets are soldered with sufficient accuracy in a serial process in formic acid atmosphere. In mechanical tests, shear forces in the range of 1 N could be achieved for the chips with 30 contact pads. We additionally performed successful temperature cycle tests on the mounted chiplets between 8 °C and -55 °C with 100 and 200 cycles, respectively – without any visible degradation to the bonding quality.

We also tested another slightly adapted approach, which allows easier scaling also at wafer level. Here, the InP chiplets were positioned on the BiCMOS chips by tacking under pressure. They were then uniformly remelted in a soldering oven under formic acid. The positioning accuracy is comparable to the other

process, so there is no subsequent displacement after tacking. This minimizes the thermal stress each chip experiences. In other words, InP chiplets on a Si chip (or later Si wafer) would see the process temperature only once. However, the shear forces currently still seem to be somewhat lower, tending to 0.8 N. In general, further optimizations will be carried out for both variants in order to increase shear strength even further.

Nevertheless, chiplets built in this way show resistance values of about $10 \text{ m}\Omega$ per bump in the 4-wire DC measurement via a daisy-chain structure. Overall, excellent broadband characteristics are achieved in back-to-back measurements (Fig. 3). These include a $770 \mu\text{m}$ microstrip line structure on the InP chiplet, the transitions between InP chiplet and BiCMOS chip, and the $360 \mu\text{m}$ access lines on the BiCMOS chip as signal path. The reflection loss of the mounted chips remains below -13 dB for frequencies up to 300 GHz. The insertion loss here basically follows the line loss, so that the loss per transition is close to 0.5 dB . For frequencies above 300 GHz, the characteristics become somewhat worse; with only -10 dB for reflection loss and 0.75 dB for insertion loss per transition. However, the flip-chip interconnection itself contributes little, so the parasitic effect mainly results from the pad geometries. These pads have been designed to be compatible with standard wafer contacting, such that in the future interconnection performance can be improved even more by matched RF pads.

This work was financed through the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the T-KOS (no. 16KIS1405) and 6G-RIC (no. 16KISK024) projects.

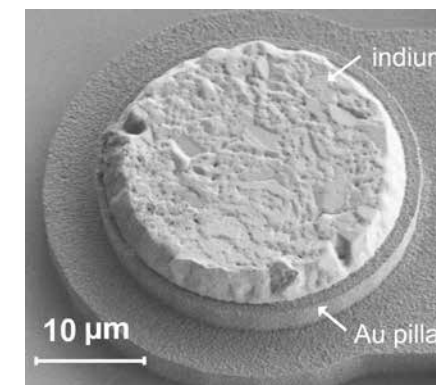


Fig. 2. SEM image of a gold pillar with indium.

Drahtlose und optische Hochgeschwindigkeits-Kommunikation wie 6G sowie THz-Sensor- und Bildgebungsanwendungen treiben derzeit die Entwicklung im Frequenzbereich deutlich über 100 GHz voran. Die herkömmlichen Silizium-CMOS-Technologien stoßen hier an ihre Grenzen. Materialien wie Indiumphosphid (InP), Silizium-Germanium (SiGe) und sogar Galliumnitrid (GaN) können dabei jedoch ihre Stärken ausspielen. Wir kombinieren sie mit CMOS- und BiCMOS-Technologien, um die Vorteile beider Technologien nutzen zu können. Am FBH haben wir die Heterointegration von eigenen InP-Chiplets auf BiCMOS-Chips des Leibniz IHP mittels einer Indium-Gold-Verbindung entwickelt. Back-to-Back-Messungen an Aufbauten mit Microstripline-Strukturen belegen die hervorragende Breitband-Eigenschaften bis 325 GHz. Die Reflexionsdämpfungen liegen im Bereich bis 300 GHz bei unter -13 dB und nur etwa $0,5 \text{ dB}$ Einfügedämpfung pro Übergang zwischen InP und BiCMOS. Über 300 GHz erreichen die Strukturen immerhin noch Werte von -10 dB und $0,75 \text{ dB}$ Einfügedämpfung pro Übergang.

Publication

M. Rausch, M. Wietstruck, C. Stölmacker, R. Doerner, G. Fischer, A. Thies, S. Knigge, H. Yacoub, W. Heinrich, "Broadband Hetero-Integration of InP Chiplets on SiGe BiCMOS for mm-Wave MMICs up to 325 GHz", 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium – IMS 2023; eCF Paper Id: 319-GF435 (2023).

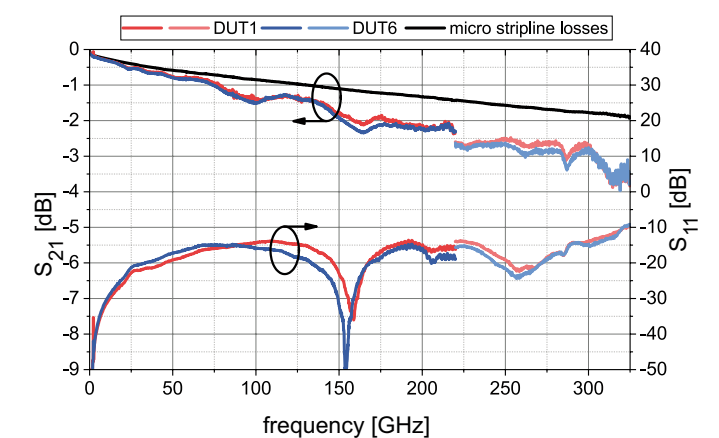


Fig. 3. Back-to-back characteristics up to 325 GHz of flip-chip bonded InP chiplets.

Gate module optimization for GaN-based Q-band RF transistors targeting communication systems

MMICs fabricated on GaN-based heterostructures are potentially interesting for terrestrial and satellite communication systems, using Q-band frequencies from 33 to 50 GHz. GaN transistor dimensions need to be scaled down for sufficient gain and power at these frequencies. The essential device element to increase cut-off frequencies is the Schottky-barrier gate module, which should be scaled down to 100 nm and below. This gate length requires GaN- or AlN-based heterojunctions with thin barrier layers of just a few nanometers to avoid short-channel effects. Additional high reliability and linearity demands for satellite communication systems makes the scaling task complex and challenging.

The unique feature of our baseline GaN MMIC technology is a gate module based on sputtered Ir Schottky metallization, which provides conformal coverage of the gate trench in SiN_x . This module was found to be beneficial with regard to reliability, it has also demonstrated reduced gate trapping effects. Additionally, FBH's gate module is technologically flexible and is used to fabricate RF devices with gate lengths from 500 to 150 nm without requiring significant modifications. Extending the existing technology towards 100 nm gate length has been tested re-

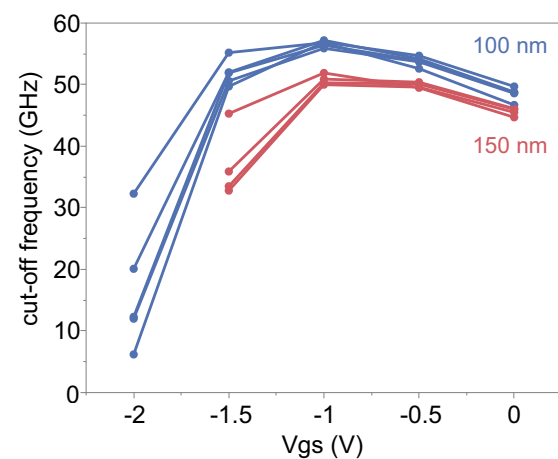


Fig. 1. Comparison of cut-off frequency versus V_{GS} for $2 \times 50 \mu\text{m}$ transistors with 150 nm and 100 nm gate length.

cently and resulted in a 5 – 10 GHz improvement of the cut-off frequency (Fig. 1). No trade-off could be observed for the other key transistor parameters, i.e. gate lag, PAE, and output power in load-pull measurements.

The RF gain of devices with reduced gate-trench dimensions is limited by the serial gate resistance, R_g , since reduced lateral gate-metal dimensions are needed for low parasitic gate capacitances as well. A lower gate resistance can only be achieved by optimizing the gate metal stack and/or increasing the gate metal thickness. With both approaches, a R_g reduction was demonstrated in devices with 250 nm gate length (800 nm T-gate wings). The gate resistance of $8 \times 125 \mu\text{m}$ transistors was reduced by 62%, as extracted from S-parameter measurements. This results in more power gain at higher frequencies (Fig. 2a) and 20 GHz improved maximum oscillation frequency (Fig. 2b). However, simple increase of metallization layer thickness in line with gate length reduction is limited by constraints of conventional lift-off lithography-metallization processing technology. Instead, electroplating allows for a gate metallization with the needed high aspect ratio. The galvanic gate module is based on a SiN_x -assisted design, where gate trenches are formed in SiN_x using the baseline FBH gate-trench module. Then, the whole wafer is covered with sputtered Ir Schottky metal, which serves as a base-plate metallization for the electroplating process in a subsequent step. This allows us to keep all advantages of the existing FBH Ir gate module mentioned above. The cross-section for the gate metal can now be tuned by the PMMA resist profile for Au electroplating. The vertical profile of PMMA walls allows electroplating metallization of the gates up to $1 \mu\text{m}$ high, which reduces R_g maximally for both 250 nm and 150 nm gate lengths (Fig. 3a). As a result, about 40% reduced gate-metal sheet resistance was achieved as compared to our baseline technology (Fig. 3b). The improvement is similar to the described above, but paves the way for the fabrication of gates with 150 nm length and shorter without trade-off for the serial gate resistance.

This work is supported by European Space Agency project "Kassiopeia" and through European program HORIZON under project "SGAN-Next" (no. 101082611).

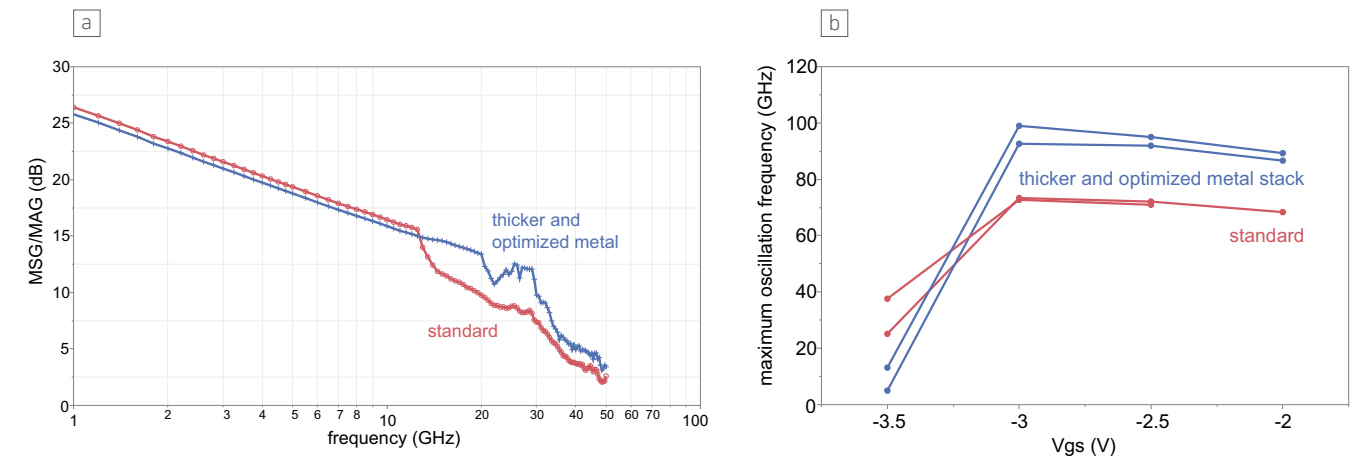


Fig. 2 (a) MSG/MAG Bode diagram for the wafers with standard technology versus revised gate module (optimized metal stack and thicker metallization) at $V_{GS} = -3 \text{ V}$ and $V_{DS} = 28 \text{ V}$, (b) extracted maximum oscillation frequency at $V_{DS} = 28$.

GaN-basierte Verstärker sind für die Satellitenkommunikation im Q-Band (33–50 GHz) hochinteressant. Jedoch müssen dazu die Dimensionen der Transistoren herunterskaliert werden. Daher entwickeln wir derzeit unsere etablierte 150 nm Technologie weiter hin zu Transistorzellen mit 100 nm Gate-länge. Die Grenzfrequenzen hierfür liegen um 5–10 GHz höher. Mit der kürzeren Gatefuß-Länge geht eine kürzere Gatekopfmetall-Länge einher. Dies führt zu kleineren Gatemetall-Querschnitten und damit zu großen Gate-Widerständen. Ein größerer Gatemetall-Querschnitt kann dann nur noch durch eine dickere Metallisierung des Gates erreicht werden. Bei konventioneller Metallisierung ist dies jedoch für kurze Gatekopfmetall-Längen von $\sim 400 \text{ nm}$ durch prozesstechnologische Grenzen nicht mehr möglich. Daher entwickeln wir nun eine neuartige galvanisch gewachsene Gate-Metallisierung, die neue Freiheitsgrade im Metallquerschnitt und in der erreichbaren Metalldicke eröffnet. Erste Transistoren mit dem neuen $1 \mu\text{m}$ dicken Galvanik-Gatemetall haben wir bereits für die 250 nm und 150 nm Gate-Technologie realisiert. Sie zeigen verringerte Gate-Widerstände, erhöhte Grenzfrequenzen und bei hohen Frequenzen auch eine höhere Verstärkung.

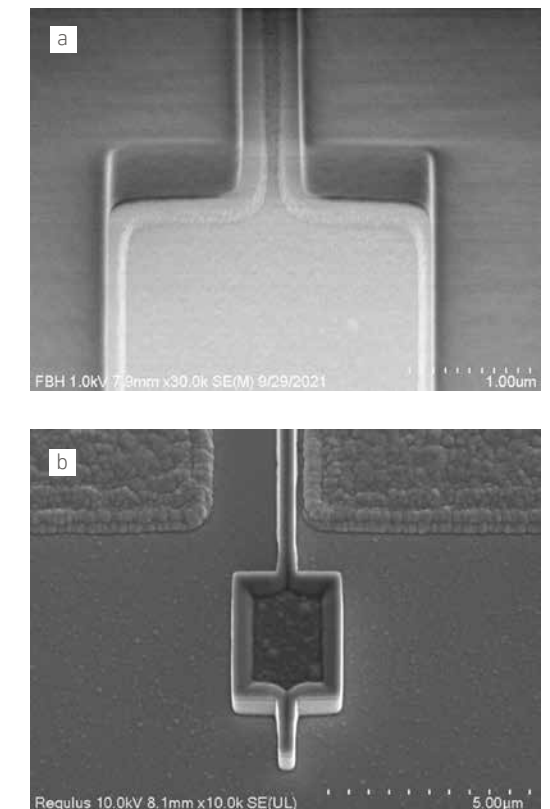
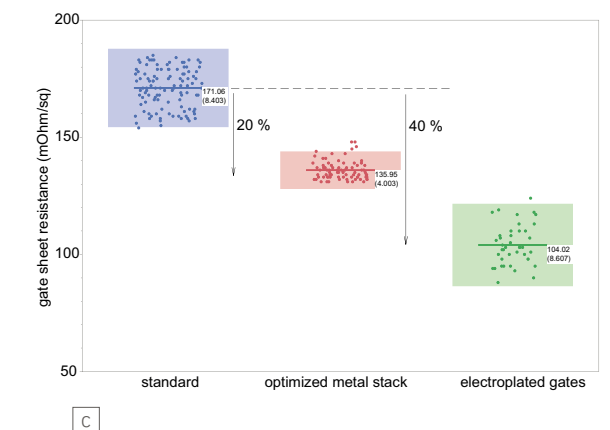


Fig. 3. SEM images showing (a) PMMA profile and (b) resulted fabricated electroplated gate with 150 nm gate length and $1 \mu\text{m}$ thick metallization. (c) Measured sheet resistance of the gate structure with 150 nm gate length for the standard versus optimized metal stack and plated gates technology.

Publication

H. Yazdani, S. Chevchenko, N. Kemf, O. Bengtsson, J. Würfl, "Towards optimized RF GaN HFETs", Space Microwave Week workshop, Netherlands (2023).



AlN-based transistors on crystalline AlN substrates for mm-wave and high-voltage switching

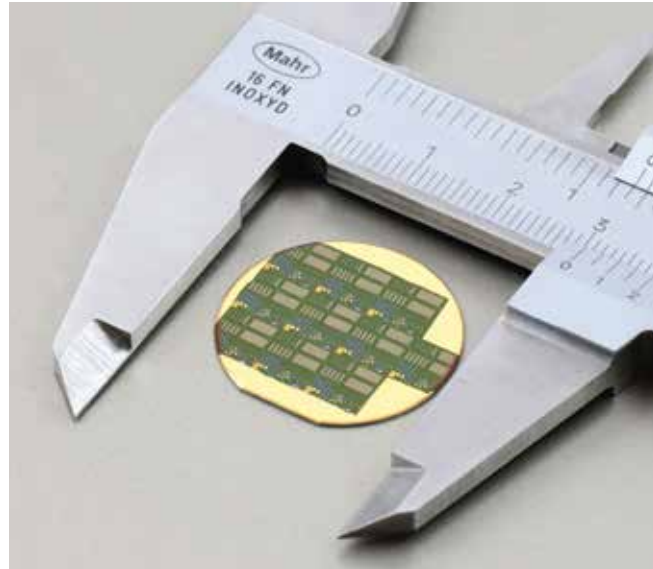


Fig. 1. 1-inch AlN-on-AlN wafer for high-voltage applications.

GaN-based high-electron-mobility transistors (HEMTs) are currently commercially successful in both high-frequency amplification and power-electronic switching. However, application-driven requirements for mobile communication and power electronics bring this relatively new wide-bandgap device technology already to its limits. Wireless communications target higher operation frequencies up to the millimeter-wave (mm-wave) range, and power-electronic converters needed for an electrified carbon-neutral society call for higher efficiency and power density. A transition towards ultra-wide band gap AlN-based HEMTs (Fig. 1) may overcome some of the current GaN-HEMT drawbacks and allow for mm-wave and high-voltage switching transistors with increased power density.

FBH recently replaced the traditional compensation-doped GaN buffer of GaN HEMTs with a buffer layer of the ultra-wide band-gap material aluminum nitride (AlN) (Fig. 2a). The AlN buffer layer needs no compensation doping due to the high back-barrier with respect to the GaN channel. Related dispersion effects as known from conventional AlGaIn/GaN HFETs thus should be

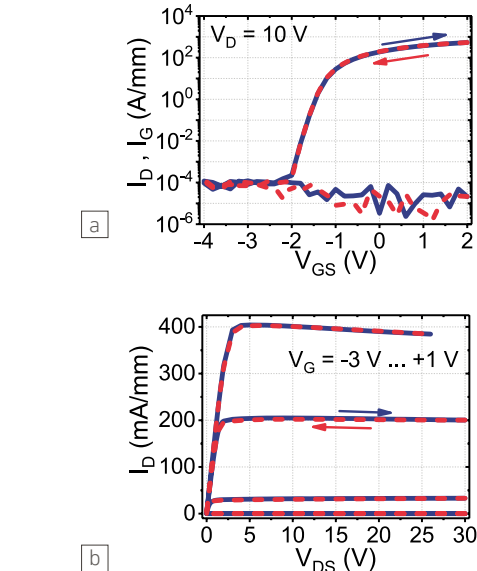


Fig. 3. IV-characteristics of HEMTs with AlN-buffer configuration on 1" AlN substrate. In-line (a) transfer and (b) output characteristics of AlN-based HEMT on 1" AlN-on-AlN wafer.

absent and allow for a higher power density in both, RF amplification and high-voltage switching. Transistors with 15 μm gate-drain separation showed 1790 V breakdown voltage and a switching power figure-of-merit of $V_{Br}^2/(R_{ON} \times A) = 2.4 \text{ GW/cm}^2$ superior to most GaN device technologies was obtained. Further, 120 m Ω transistors demonstrated with 10 A/950 V switching transients their capability to be used in kW-range power converters. Also, RF transistors in a 150 nm gate technology with 2.2 W/mm power density for 30 GHz amplification were recently realized.

In a next step towards AlN-based electronic devices, the AlGaIn/GaN/AlN material stack was grown by MOCVD on crystalline 1" AlN substrates (Fig. 2b,c,d) rather than on foreign materials like silicon or silicon carbide. This transition from heteroepitaxy to homoepitaxy opens up additional opportunities for high-power transistors. The very low thermal impedance due to the high AlN thermal conductivity (340 W/(m·K)) combined with the absence of any thermal boundary resistance between buffer and substrate allows to dissipate more power into the device. The

very low material defect density will lead to improved device reliability and reduced dispersion effects. Also, monolithic integration for high-voltage power ICs is easily achievable due to the insulating properties of the AlN substrate. Signs for the reduced dispersion can already be seen in recently performed first electrical AlN-on-AlN transistor characterizations (Fig. 3). No threshold voltage hysteresis effects are now detected when measuring the transfer characteristics forward and backward; also, the kink-effects in the output characteristics are now absent. These effects are typically present in transistors grown with heteroepitaxy on SiC substrates. The number of electronic trapping states is thus reduced in AlN-on-AlN transistors, enabling to develop more stable and reliable AlN-based electronics for modern power-electronics demands.

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

O. Hilt, F. Brunner, E. B. Treidel, M. Wolf, J. Würfl, "GaN-channel HEMTs with AlN buffer for high-voltage switching", 2021 Device Research Conference (DRC), Santa Barbara, USA, pp. 1-2, doi: 10.1109/DRC52342.2021.9467164 (2021).

O. Hilt, F. Brunner, M. Wolf, E. B. Treidel, J. Würfl, A. Thies, A. Mogilatenko, "10 A/950 V switching of GaN-channel HFETs with non-doped AlN buffer", 35th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Hong Kong, pp. 374-377, doi: 10.1109/ISPSD57135.2023.10147681 (2023).

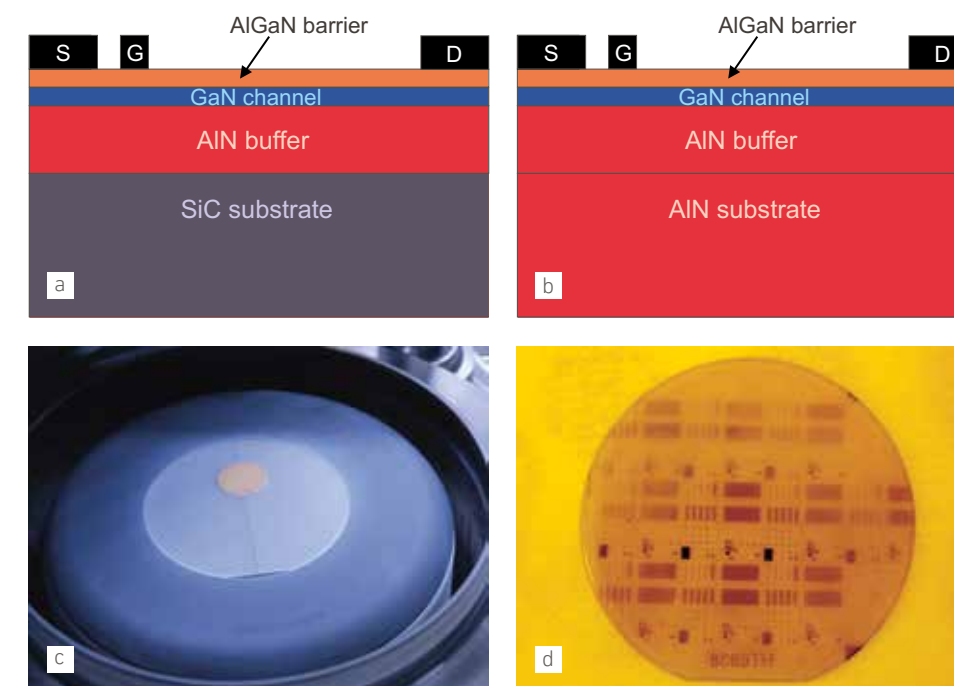


Fig. 2. AlGaIn/GaN/AlN-on-AlN platform. (a) Cross-section of the AlGaIn/GaN/AlN-on-SiC platform, (b) cross-section of the AlGaIn/GaN/AlN-on-AlN platform, (c) 1" single-crystal AlN substrate in the MOCVD reactor, (d) partially processed 1" AlN-on-AlN wafer.

Vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET devices for next-generation power applications

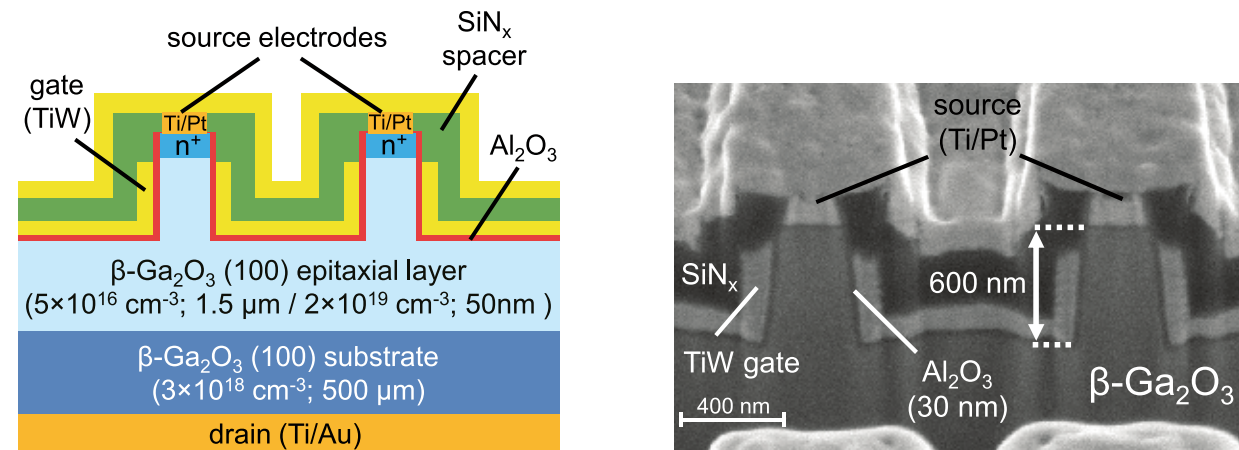


Fig. 1. (a) Schematic cross section of the vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET and (b) SEM image, showing the processed structures on epitaxial $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ wafers.

The semiconductor $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, characterized by its ultra-wide band-gap of around 4.8 eV, has gained significant interest in recent years with respect to the next generation of power electronic devices. The estimated high breakdown strength of 8 MV/cm and the resulting high Baliga's figure of merit of $> 3,000$ indicate that much more compact and therefore efficient power converters can be realized with this material compared to more established SiC and GaN technologies. Already impressive performances of lateral $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET devices have been demonstrated. These transistors feature currently an average breakdown strength as high as 5.5 MV/cm and record breakdown voltages up to 8 kV. Moreover, the power figure of merit is steadily increasing and almost surpasses a value of 1 GW/cm² due to continuous material quality improvements and device optimizations. However, to use the full potential of the material properties of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ for high-voltage/high-current applications, a vertical device structure is preferred over a lateral design for active devices. This has been widely demonstrated for vertical Schottky barrier diodes based on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Here, the main advantages include lower chip area requirements at high voltage levels, ideal separation of high-voltage potentials, improved reliability, and thermal performance as well as the ability to reach higher current levels.

In collaboration with the Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), FBH has started activities to realize vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET devices with the schematic structure shown in Fig. 1(a). The fabrication of such devices was carried out on epitaxial (100) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ wafers realized at IKZ. They consist of a 1.5 μm $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ drift and channel layer ($N_D \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) and a 50 nm n^+ layer ($N_D \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) for the source contact, which were grown by metal-organic chemical vapor deposition on (100) $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ substrates ($N_D \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Fin structures were realized using e-beam lithography and dry etch processing. Gate stack and SiN_x spacer were patterned by photoresist planarization and self-aligned etching procedures. The final multi-fin device consists of 9 fins with 10 μm length and a pitch of 1.2 μm , shaping a total device area of around 100 μm^2 . Fig. 1(b) shows the cross-section of a fully processed vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET.

A representative transfer characteristic is presented in Fig. 2. It demonstrates decent device functionality with proper modulation of the drain current, featuring an on/off current ratio of around 10^5 . Furthermore, the threshold voltage is around +4.2 V, thus emphasizing a normally-off characteristic of the device. Clockwise hysteresis was observed, which indicates trapping of charge carriers in semiconductor/dielectric interface defect-states, which originated from the fin dry etch process. Nevertheless, three-terminal off-state breakdown measurements of the verti-

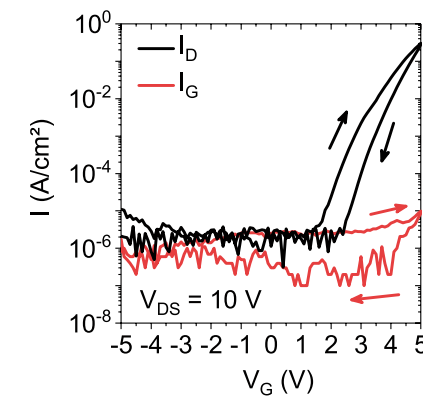


Fig. 2. Representative transfer characteristic of a fabricated vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET device.

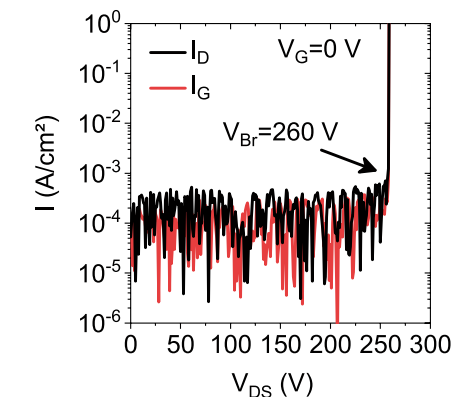


Fig. 3. Three-terminal off-state breakdown measurement of a vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET device, showing catastrophic breakdown at 260 V.

cal $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFET were carried out, revealing an abrupt and catastrophic breakdown of the device at 260 V, as shown in Fig. 3. Considering the fact that the drift layer of the device is only 950 nm thick, this breakdown voltage corresponds to an average breakdown strength of around 2.7 MV/cm. This value is already much higher than what was previously demonstrated for lateral (100) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFETs and also higher than for vertical SiC- or GaN-based power transistors. Thus, our investigations demonstrate the high potential of vertical FinFET architectures based on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ to realize high-voltage transistor devices for next-generation power applications.

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, M. Klupsch, A. Popp, S. Bin Anooz, T.-S. Chou, Z. Galazka, K. Ickert, M. Matalla, R.-S. Unger, E. Bahat Treidel, M. Wolf, A. Trampert, J. Würfl, O. Hilt, "Enhancement-mode vertical (100) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FinFETs with an average breakdown strength of 2.7 MV/cm", Jpn. J. Appl. Phys. 62, SF1010 (2023).

Dank seiner exzellenten Materialeigenschaften hat das Halbleitermaterial Galliumoxid ein hohes Potenzial, um in leistungselektronischen Systemen der nächsten Generation eingesetzt zu werden. Zu verdanken ist dies insbesondere seinem hohen Bandabstand von etwa 4,8 eV und der damit zu erwartenden hohen Durchbruchfestigkeit von 8 MV/cm. Um das volle Potenzial von $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ für Hochspannungs-/Hochstromanwendungen nutzen zu können, bietet sich für aktive Bauelemente eine vertikale Bauelementstruktur an. Im Gegensatz zu lateralen Designs ist der Chipflächenbedarf bei hohen Spannungen geringer, Hochspannungspotentiale lassen sich ideal trennen, die Zuverlässigkeit und das thermische Verhalten sind besser, außerdem sind damit höhere Ströme erreichbar.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung wurden nun am FBH erstmalig vertikale FinFETs auf der Basis von (100) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ prozessiert und charakterisiert. Die Transistoren zeigen selbstsperrende Eigenschaften und eine mittlere Durchbruchfestigkeit von 2,7 MV/cm. Damit übertreffen sie bereits heute deutlich die Werte, die zuvor an lateralen (100) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -MOSFETs demonstriert wurden, und jene, die SiC- und GaN-basierte Leistungstransistoren erreichen.

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

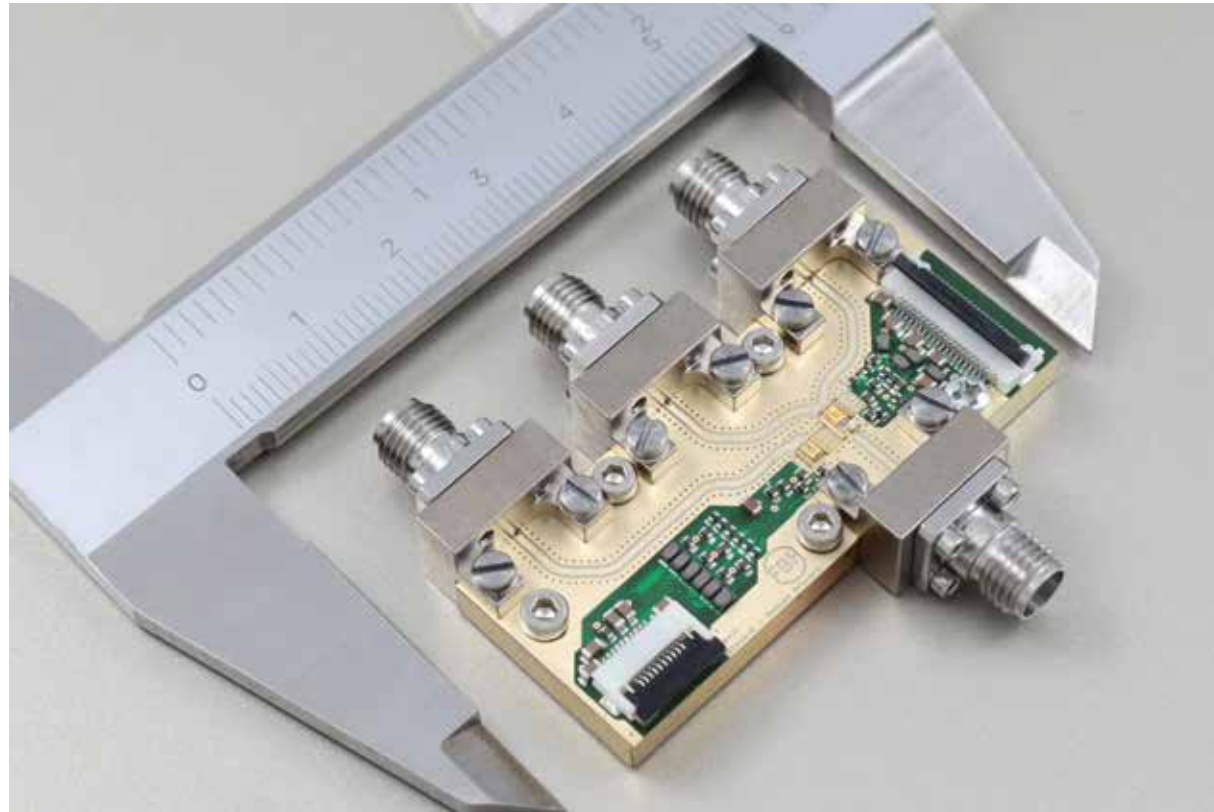


Fig. 1. Compact digital GaN-based class-E outphasing PA module; size: 50 x 45 mm².

Modern 5G/6G wireless systems have to cope with steadily increasing data rates and require more complex modulation schemes as well as spectrally efficient signals with a high peak-to-average power ratio (PAPR). The design of energy-efficient transmitter architectures in microwave radios has therefore become more challenging than ever. All-digital RF transmitters gain more and more importance in this context. However, the power-added efficiency of power amplifiers (PAs) is still a bottleneck. The PA is the major power dissipation contributor in the front-end, thus significantly affecting the overall efficiency. At this point, the switch-mode class-E approach has been the preferred solution, but mostly limited with respect to peak power operation. Combining this technique with the outphasing concept, however, can overcome these limitations.

In 2022, we have presented the first GaN-based digital class-E outphasing power amplifier module for 5G base station applications in the 4–6 GHz range. This amplifier consists of two digital GaN PA MMICs with a 4:1 size ratio between the final-stage transistor gate-widths. The amplifier chips follow a compact digital layout approach without any reactive matching to provide broadband operation and flexibility in terms of signal frequency. The frequency of operation can easily be changed by adjusting the output network, which is a major advantage compared to usual class-E designs. Both MMICs have been fabricated with FBH's 0.25 μm GaN-HEMT process. A bond-wire-based load network shapes the typical class-E waveform characteristics and combines the two outputs for outphasing at 4 GHz in order to maximize efficiency at power back-off.

At 4 GHz a maximum output power of 8.4 W and a power gain of 23 dB were reached for a final-stage drain supply voltage V_{dd} of 27 V. Peak final-stage drain efficiencies of 84 % and 38 % were achieved for a V_{dd} of 10 V at 0 dB and 11.2 dB back-off, respectively. For the same supply voltage, applying a modulated 20 MHz LTE signal with an encoded PAPR of 6.5 dB the digital class-E outphasing PA achieves a final-stage drain efficiency of 41 %. Furthermore, an error vector magnitude of 5.3 % as well as an adjacent channel power ratio of more than 40 dB prove a good linearity. Due to its flexibility regarding digital input and operation modes (pulse-width modulation, outphasing, switching-off one PA), the proposed power amplifier module is a promising candidate to reduce energy consumption in 5G base stations.

This work was funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under ref. WE 6288/3-1. It was additionally supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

Die Anforderungen an drahtlose Systeme für die moderne 5G/6G-Mobilkommunikation steigen weiter. Immer höhere Datenraten und komplexere Modulationsverfahren machen auch das Design energieeffizienter Senderarchitekturen anspruchsvoller denn je. Um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden, haben wir den digitalen Klasse-E-Schaltverstärker-Ansatz mit Outphasing kombiniert. 2022 konnten wir das erste GaN-basierte digitale Klasse-E Outphasing-Verstärkermodul für 5G-Basisstationsanwendungen von 4 bis 6 GHz vorstellen. Es verwendet zwei kompakte digitale Verstärkerchips, die mit der 0,25 μm GaN-HEMT-Technologie des FBH gefertigt wurden. Ein Bonddraht-basiertes Lastnetzwerk kombiniert die beiden Ausgänge für das Outphasing und sorgt für maximale Effizienz. Wirkungsgrade von bis zu 84 % und eine Ausgangsleistung von 8,4 W wurden erreicht. Darüber hinaus liefert der linearisierte Verstärker bei einem 20 MHz LTE-Eingangssignal eine Effizienz von 41 %. Das neuartige Klasse-E Outphasing-Modul ist besonders flexibel hinsichtlich der digitalen Eingänge und Betriebsmodi und damit ideal geeignet, um den Energieverbrauch von 5G-Basisstationen zu reduzieren.

Publication

T. Hoffmann, L. Schellhase, W. Heinrich, A. Wentzel, „A 4 GHz GaN-based Digital Class-E Outphasing PA“, IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS) Digest, pp. 622 - 625, Denver, CO, USA (2022).

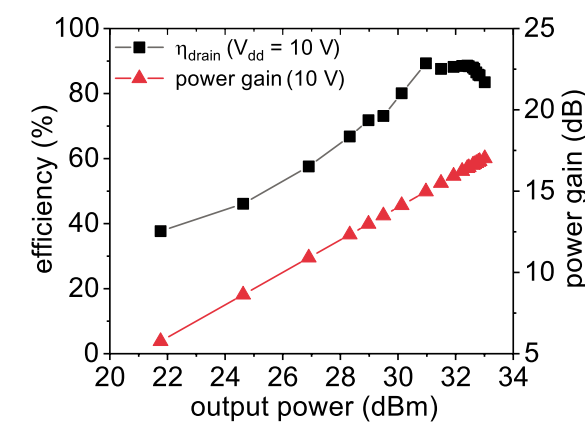


Fig. 2. Measured final-stage drain efficiency (η_{drain}) and power gain vs. output power of proposed digital GaN-based class-E outphasing PA at 4 GHz, $V_{dd} = 10$ V, PBO: 0 ... 11.2 dB.

Common-gate low-noise amplifier with built-in switching feature for 5G mobile communication

The 5G standard leads to a further leap in the performance of mobile communications systems. Ongoing improvements are necessary and accompanied by challenging scenarios, which include single-chip transceiver solutions integrating wideband high-power transmitter and low-noise receiver functionality. Single-chip realizations enable innovative architectures and take high-performance transceiver integration to a whole new level.

Traditionally, transceiver front-ends consist of an RF power amplifier (PA), a low-noise amplifier (LNA), and an antenna switch. Due to the good power-handling capability of GaN HEMTs, highly linear and rugged LNAs can be realized without any need for protective circuitry as required, e.g., for GaAs-based front-ends. But still, even single-chip realizations of GaN-based transceiver frontends rely on antenna switches to isolate transmitter (TX) and receiver (RX) paths. The key challenging issue is to realize a switch that combines high isolation with low insertion loss.

Thus, we have developed a novel robust LNA, which employs a common-gate (CG) transistor configuration that can be switched into a high-isolation (off) mode, rendering an additional antenna switch obsolete. The new concept avoids signal degradation on the receive path caused by the switch while reducing transceiver complexity and chip size.

A three-stage LNA MMIC was designed for C-band frequencies using FBH's 250 nm GaN HEMT process. The first two stages of the LNA employ $12 \times 50 \mu\text{m}$ CG transistors. A pair of switching transistors is used to either provide DC ground, enabling low-noise amplification, or to disconnect from DC ground, forcing drain-source current to 0 mA, thus switching the LNA into the off state. The third stage of the LNA uses a $12 \times 50 \mu\text{m}$ common-source transistor along with source degeneration inductors to maintain the overall stability and to increase the gain of the LNA.

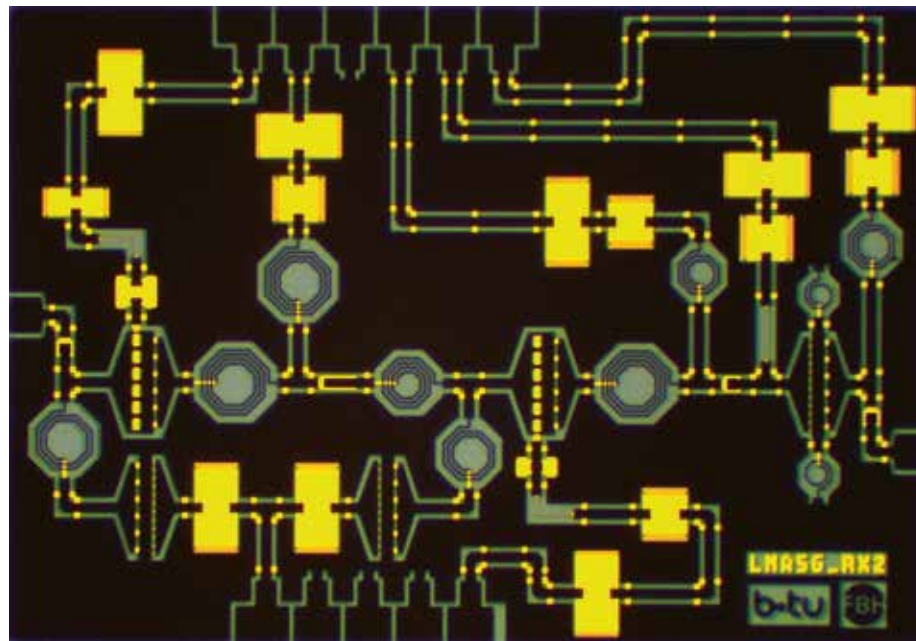


Fig. 1. Chip photograph of the LNA MMIC with integrated switch, sized only $3.6 \times 2.5 \text{ mm}^2$.

In low-noise amplification mode, the LNA demonstrates state-of-the-art gain and noise performance in C-band (25 dB and 2.1 dB, respectively at 5 GHz). In isolation (off) mode, the circuit attains the properties of a switch in off-state, attenuating the RF signal and providing a very high isolation of 50 dB at 5 GHz. In addition, the circuit provides an excellent dynamic range, a crucial feature for the integration of a very sensitive receiver with a high-power transmitter.

This research is carried out within the Joint Lab BTU-CS – FBH Microwave with financial support from Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under grant no. 426573565. This work was also partly funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

Die neue Generation der Mobilkommunikation (5G) benötigt deutlich leistungsfähigere Sender-Empfänger-Frontends mit noch geringeren Abmessungen. Im Hinblick auf die weitere Miniaturisierung wurde bereits gezeigt, dass ein empfindlicher Empfänger und leistungsstarker Sender auf dem gleichen GaN-Chip integriert werden können. Traditionell entkoppelt bei diesen Chips ein Antennen-Schalter Sender und Empfänger.

Um Schalter-Verluste zu vermeiden und somit die Empfänger-Empfindlichkeit zu erhalten, haben wir in unserem Joint Lab einen rauscharmen Verstärker nach einem neuen Konzept entwickelt. Dieser Verstärker kann selbst geschaltet werden, ebenso sinken Platzbedarf und Komplexität der Schaltung. Einen entsprechenden Demonstrator haben wir in der 250 nm GaN-HEMT-Prozesslinie des FBH gefertigt. Messungen belegen die exzellenten Rausch- und Verstärkungseigenschaften in Verbindung mit der hohen Isolation. Das Zusammenspiel dieser beiden Eigenschaften ist eine wichtige Komponente für zukünftige hochperformante Sendempfangs-Chips.

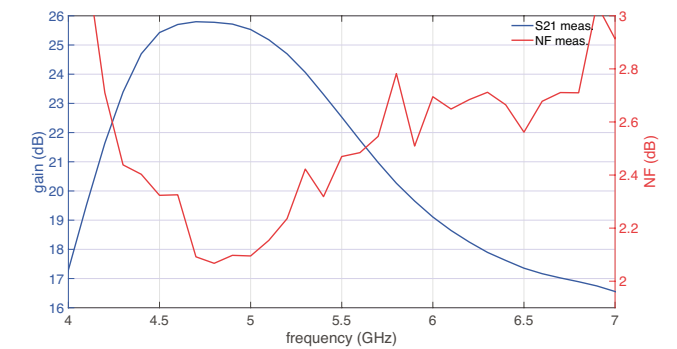


Fig. 2. Gain and noise figure of the LNA: on-wafer measurements in "on state".

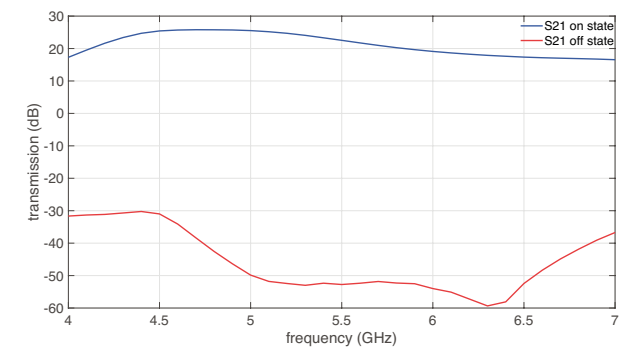


Fig. 3. Transmission measurements of the LNA on-wafer in "on" (blue line) and "off" states (red line).

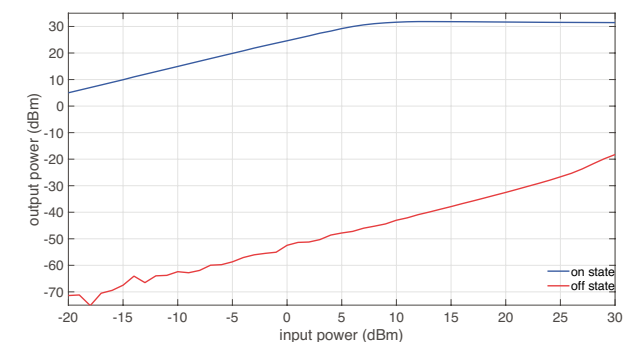


Fig. 4. On-wafer power measurements of the LNA at 5 GHz: LNA operation ("on state", blue line) and isolation operation ("off state", red line).

Publications

M. K. Rao, R. Doerner, S. A. Chevchenko, S. Haque, M. Rudolph, "Common-Gate LNA MMIC with Switching Feature using GaN-HEMT for 5G RF Front-End", IEEE Microwave and Wireless Technology Letters (MWTL), accepted for publication (2023).

M. K. Rao, R. Doerner, H. Yazdani, M. Rudolph, "GaN-HEMT Based Common-Gate LNA MMIC with Integrated Switch for Compact 5G Transceivers", 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Bangalore, India, pp. 1104-1107, DOI: 10.1109/MAPCON56011.2022.10047410 (2022).

AlGaN/GaN-based THz detector and detector arrays for THz cameras

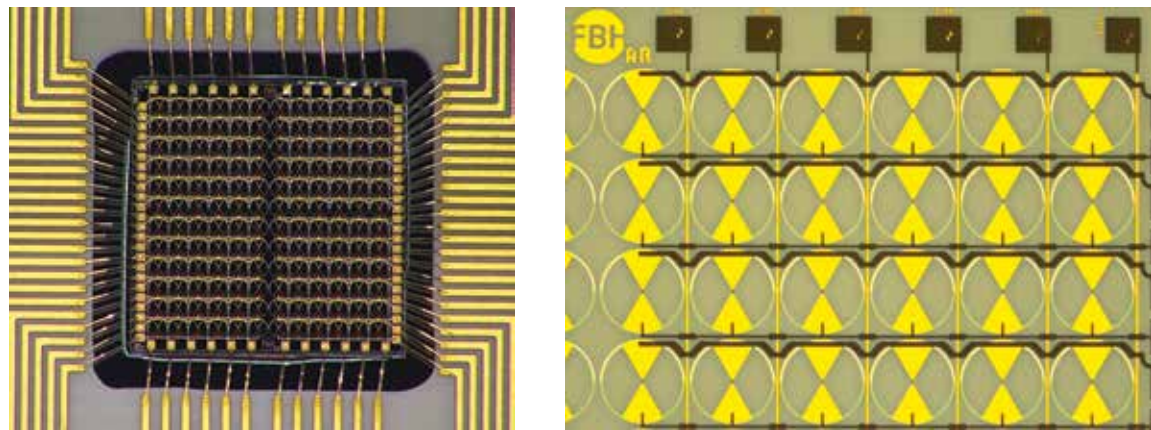


Fig. 1. Mounted 12 x 12-pixel focal plane array and chip close-up of bow-tie detectors.

The main reasons for THz gap existence are cost and complexity of existing THz systems and not the lack of possible applications like in-line quality control. One of the key elements to overcome these obstacles is to employ integrated semiconductor technologies for THz detectors and sources. The frequency range between 100 and 800 GHz is within reach using existing semiconductor technologies and chip antenna approaches. Thus, our primary focus lies in a first step on efficient mass-producible and robust THz detectors and arrays as crucial elements for future industrial applications. Such arrays allow for improved imaging of enlarged areas and open up the possibility for high-speed THz cameras.

Accordingly, we have advanced our AlGaN/GaN HEMT THz FET detector activities at FBH towards detector arrays and THz cameras. The individual THz FET detectors are based on structures already published [1] but have now been upgraded with an advanced antenna design. Seamless integration of antenna and FET improve matching and avoid regions of low sensitivity. Therefore, the antenna wings and the surrounding guard ring form a unit, and the open angle of the antenna wings is changed.

Moreover, the 12 x 12 detector arrays are available with bow-tie and slot-bow-tie antenna structures.

The detector arrays' read-out electronics have undergone some significant improvements. THz detector arrays with 12 x 12 elements have been equipped with read-out electronics based on a high-speed Field Programmable Gate Array (FPGA), interacting with four analog-digital converters to improve read-out speed. A photograph of the 144 elements THz camera array with bow-tie antenna structure and the packaged version of the entire chip is provided in Fig. 1. The chip with slot-bow-tie antenna structure is presented in Fig. 2. Narrow-band arrays across the THz range are also available. The transistor layout has been adapted to further increase the sensitivity of the detectors. To achieve this, the gate length was reduced to 150 nm, the gate width was increased to 5 μm , and an asymmetry between the gate and the ohmic contacts was realized. Fig. 3 shows the measured sensitivity for a single detector. The THz radiation is coupled through the chip substrate, while a hyper hemispherical silicon lens was used to focus the incoming terahertz radiation on a

Systeme, die Terahertz (THz)-Strahlung nutzen, können unter anderem zur Inline-Qualitätskontrolle oder zerstörungsfreier Materialprüfung eingesetzt werden. Jedoch sind die derzeit genutzten Systeme teuer und komplex – weshalb der THz-Spektralbereich für Massenanwendungen derzeit kaum erschlossen wird. Dieses Hemmnis ließe sich beheben, würden THz-Sender und -Empfänger mithilfe von Halbleiterprozessen gefertigt werden. Mit aktuellen Halbleiterprozessen ist der Frequenzbereich zwischen 100 und 800 GHz bereits gut zu erschließen. Wir arbeiten an THz-Systemen, die komplett auf unseren MMIC-Prozessen am FBH basieren und konnten

weitere Fortschritte auf der Detektorseite erzielen. So haben wir die Empfindlichkeit der GaN-MMIC basierten Detektoren gegenüber bereits veröffentlichten Ergebnissen [1] weiter gesteigert. Darüber hinaus haben wir THz-Kameras mit 144 Pixeln und in zwei verschiedenen Varianten realisiert: mit Bow-Tie- und Slot-Bow-Tie-Antennenstrukturen, die eine hohe Empfindlichkeit der einzelnen Detektoren im Frequenzbereich zwischen 100 und 800 GHz zeigen. Sie liefern die Basis, um diese Kameras mit Indiumphosphid-basierten THz-Quellen zu THz-Systemen mit hoher Dynamik zu kombinieren.

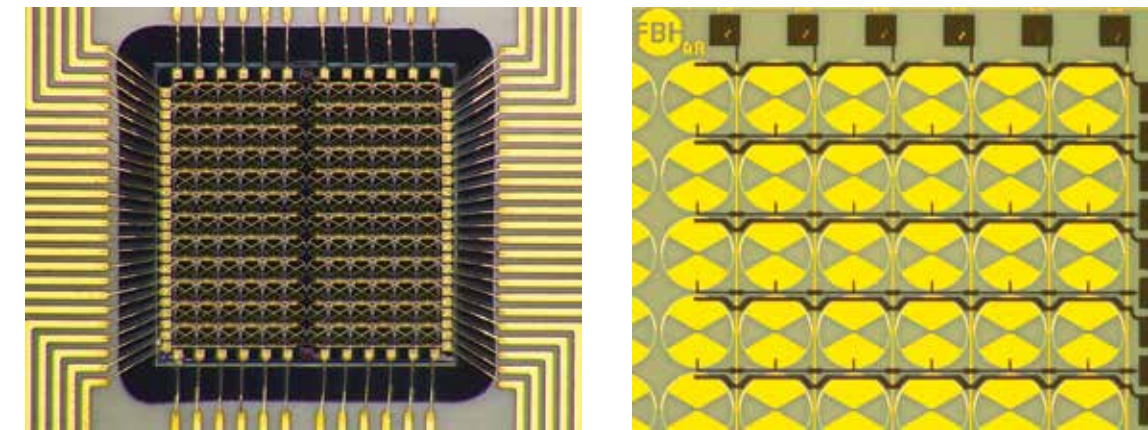


Fig. 2. Mounted 12 x 12-pixel focal plane array and chip close-up of slot-bow-tie detectors.

single detector area. Prior calibration of the THz power available at the lens is determined using a calibrated power sensor. High sensitivity is reached in the frequency range between 100 GHz and 800 GHz. The sensitivity was computed, including the losses of the silicon lens. A relatively flat noise-equivalent power (NEP) with a minimum of 52 $\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Fig. 3) was reached. This high sensitivity allows to build THz systems with a high dynamic range based on our in-house GaN- and InP-MMIC processes.

We gratefully acknowledge the partial financial support in the frame of the EFRE funding "Anwendungszentrum Höchstfrequenztechnologien". Further financial support was provided by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in the frame of Research Fab Microelectronics Germany (FMD), reference 16FMD02.

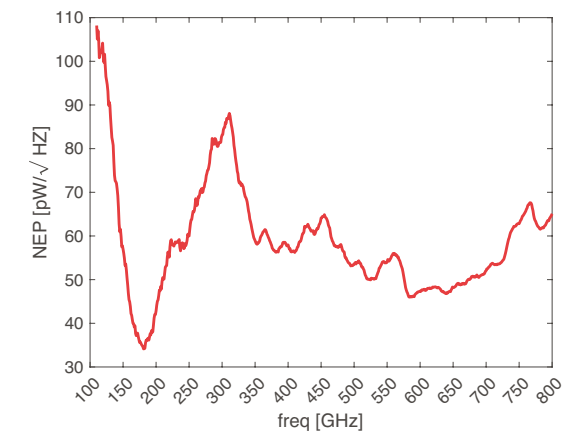


Fig. 3. Noise-equivalent power (NEP) of a single detector between 100 GHz and 800 GHz.

Publication

[1] M. Bauer, A. Räder, S. Chevtchenko, K. Osipov, D. Cibirait, S. Pralgauskaitė, K. Ikamas, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer, H. Roskos, "A High-Sensitivity AlGaIn/GaN HEMT Terahertz Detector with Integrated Broadband Bow-Tie Antenna", IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 9, no. 4, pp. 430-444 (2019).

Tracing the electron motion in plasma – a powerful characterization tool for ICP plasmas

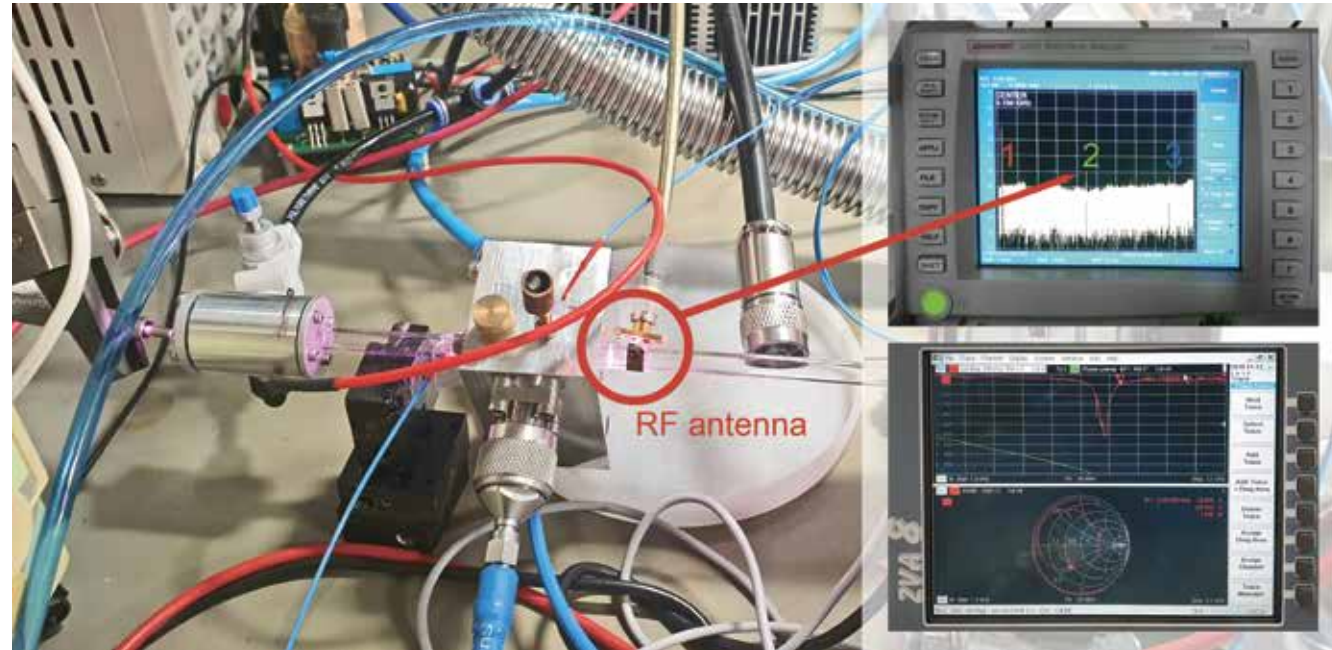


Fig. 1. The ICP source (aluminum block in the center) in the microwave and optical measuring system.

Most of the newly developed plasma sources use microwaves for an efficient excitation. In this frequency range – for example at 2.45 GHz – ion and electron densities are constant with time. The inductively coupled version employed in our sources uses the magnetic instead of the electric field for excitation. The advantages are obvious: There are no electrodes that contaminate the plasma through ion bombardment, the plasma does not interact with the walls, also the electron density is high and the energy transfer from the microwave generator to the plasma is good (in microwave terms: good impedance matching).

However, the inductive excitation of the plasma masks several details. Therefore, special characterization methods are required. Because a strong microwave magnetic field drives the electrons, a periodic change in their orbits is to be expected. When the mean free path of the electrons is large, as in the low-pressure regime, the so-called Lorentz forces modulate the path and hence conductivity. With a constant and strong magnetic field, as in the electron cyclotron resonance case, the electrons would show a circular motion, synchronously with the pulsating electric field. In the presence of a strong pulsating microwave magnetic field,

the situation becomes more complex, since the assumption of a time-independent quasi-circular path is no longer valid. We obtain information on this non-linear behavior from the harmonics of the emitted microwave signal.

The plasma jet flowing outside the source consists not only of hot and ionized gas. The conducting medium also behaves as a waveguide for the excitation microwave signal. This results in a surface wave, which keeps the plasma warm at long distances from the source. In addition, it allows to detect harmonics in the microwave signal. Intensity and number of harmonics are generally seen as a measure of interaction between the microwave field and the electrons. We used the measurement setup in Fig. 1 to investigate, among others, the production of atomic oxygen, which is important for many chemical processes. Oxygen is heavier than, for example, nitrogen as the most investigated plasma. However, oxygen molecules dissociate more easily in single atoms than those of nitrogen. Therefore, their mean free path is longer, manifested by stronger surface waves and harmonics. At higher pressure, the effect is smaller.

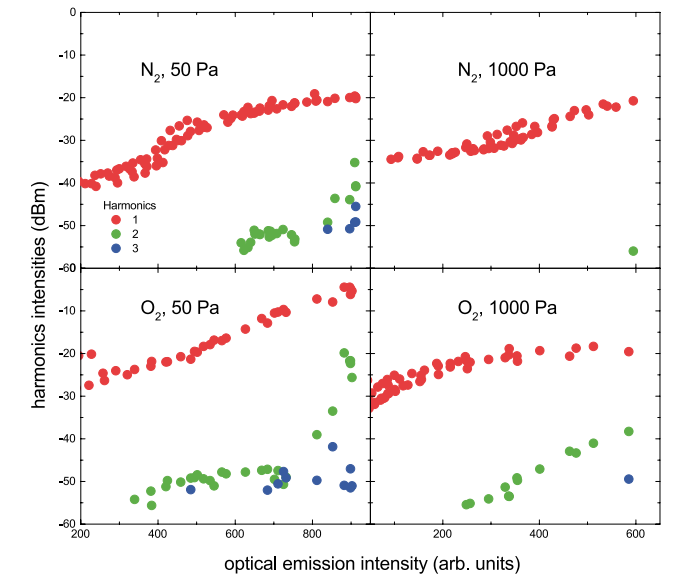


Fig. 2 Investigation of the plasma properties by means of RF harmonics radiated (red, green, blue dots: 1st, 2nd and 3rd harmonics, respectively)

Fig. 2 compares the plasma behavior at low pressure (approx. 50 Pa) and high pressure (1000 Pa). The RF signal radiated from the plasma is plotted as a function of the intensity of the light emitted by the plasma. The RF component at the fundamental frequency (red points) varies linearly with the absorbed microwave power, the latter increases monotonically with the optical emission, independently of pressure. At low pressures, however, higher harmonics appear. They increase non-monotonically with the excitation power. These properties indicate the complexity of the microwave-plasma interaction. Because each type of gas shows a specific variation (N_2 , O_2 , Ar, He have been investigated so far), the presented method turns out to be a powerful characterization tool for ICP plasmas.

This work is funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) within project PO 1018/5-3 no. 389090373.

Die meisten neu entwickelten Plasmaquellen nutzen Mikrowellen für eine effiziente Anregung. In diesem Frequenzbereich, beispielsweise um 2,45 GHz, bleiben Ionen- und Elektronendichte mit der Zeit konstant. Bei unseren Quellen koppeln wir die Energie induktiv an die Plasmen und verwenden dazu das magnetische statt des elektrischen Felds für die Anregung. Die Vorteile liegen auf der Hand: Es werden keine Elektroden benötigt, die das Plasma durch Ionen-Bombardement verunreinigen, es tritt keine Wechselwirkung des Plasmas mit den Wänden auf. Zudem werden Elektronen in hoher Dichte und die Energie vom Mikrowellengenerator optimal zum Plasma übertragen (aus Mikrowellensicht: gute Impedanzanpassung). Allerdings ist die Wechselwirkung der Felder mit den Elektronen komplex, da die treibende Kraft, das pulsierende Magnetfeld, die Trajektorie der Elektronen ändert. Es entsteht ein nichtlinearer Prozess, den wir mithilfe von Harmonischen der Anregungsfrequenz vom ausgesendeten Signal vermessen. Damit steht uns nun ein leistungsfähiges Verfahren zur Verfügung, um ICP-Plasmen spezifisch zu charakterisieren.



TEAM III-V Technology



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.

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:

- > **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, Ga₂O₃, 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.

- > **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, Ga₂O₃ und Diamant. Diese realisieren wir auf der industrie-kompatiblen und zugleich flexiblen Prozesslinie auf Waferdurchmessern von 2" bis 4" wie auch auf kleineren Proben und Waferteilstücken. Die Prozesse entwickeln wir dabei stetig weiter.

- > **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 modules, develop fabrication technology, deliver epitaxial wafers or develop and build demonstrator systems.

- > **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. Prozessmodule bereitstellen, Fertigungstechnologien entwickeln, Epitaxiestrukturen liefern oder Gerätedemonstratoren entwickeln und fertigen.

Closing the wavelength gap – laser diodes around 700 nm with GaInAsP quantum wells

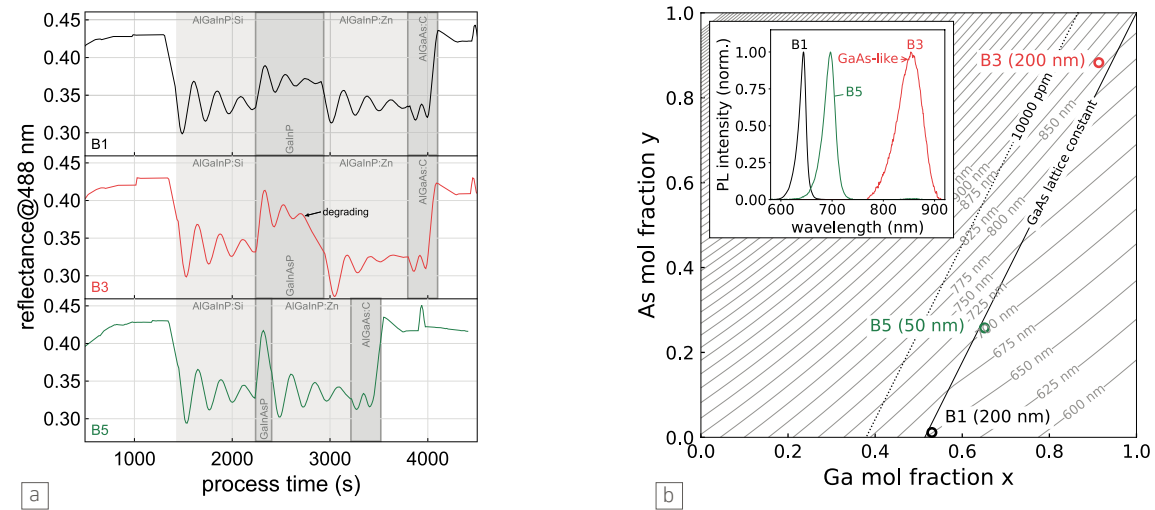


Fig. 1. (a) 488 nm in situ reflectance transients of samples B1, B3 and B5 showing a strong drop indicating surface roughening for B3 as a consequence of phase separation (arrow); (b) contour plot showing the calculated transition wavelengths for the DHS bulk layer configuration. The open symbols denote the intersection points between transition wavelength and lattice mismatch for each individual sample. The inset shows measured PL spectra used to deduce the transition wavelength for each sample. A broad and unexpectedly long emission for B3 is clearly visible.

FBH has demonstrated laser diodes from 630 nm–1180 nm with state-of-the-art performance. Only the wavelength range between 690 nm and 730 nm could not be covered in the past. However, upcoming applications in atomic clocks and quantum technology require laser diodes emitting, for example, at 698 nm or 707 nm. The lattice mismatch of well-established ternary compounds GaInP (below 690 nm) and GaAsP (above 730 nm) is too big to be used around 700 nm. The quaternary GaInAsP obtained by mixing those two ternary materials suffers from a miscibility gap. This leads to an inhomogeneous composition along with a strongly corrugated surface morphology when phase separation occurs.

Although we ultimately head for GaInAsP quantum wells (QWs), we nevertheless started by growing lattice-matched GaInAsP bulk layers first. This allowed us to study how phase separation actually compromises the epitaxial growth. Fig. 1a shows the

in situ reflectance transients at 488 nm during growth of an $n\text{-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P/Ga}_x\text{InAs}_y\text{P/p-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P)}$ double heterostructure (DHS) for three different samples, varying only the Ga and As mol fractions in the sandwiched $\text{Ga}_x\text{InAs}_y\text{P}$ layer. B1 has no As incorporated and shows the expected PL emission around 650 nm (Fig. 1b), inset, black line). Adding As and Ga for sample B3 resulted in decreasing reflectance during growth, indicating roughening (Fig. 1a), B3) along with a very broad PL emission around 860 nm, which we attribute to the formation of GaAs-like domains by phase separation. Reducing the thickness of B3's $\text{Ga}_x\text{InAs}_y\text{P}$ layer from 200 nm down to 50 nm (Fig. 1, green) restored the expected PL emission around 700 nm along with a smooth sample surface morphology (Fig. 2). This proved that phase separation is also kinetically driven. To successfully grow $\text{Ga}_x\text{InAs}_y\text{P}$ QWs with compositions within the miscibility gap it is important to explore the strain-thickness limits to prevent phase separation.

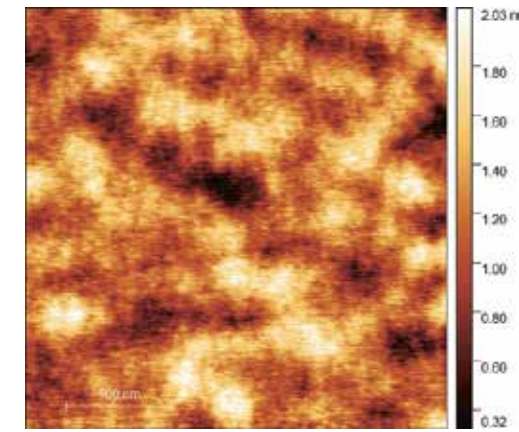


Fig. 2. AFM (atomic force microscopy) image showing a smooth GaInAsP double heterostructure surface taken across a $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ area with an RMS roughness of 0.2 nm.

These findings paved the way for growing real laser structures with 7 nm thick and compressively strained GaInAsP QWs. Fig. 3 shows LIV characteristics of 4 lasers with different Ga and As content in the QW. Compared to the reference GaInP QW laser (black), all of the quaternary QW lasers show competitive output powers at an operation current of 2 A [1] and thus enable us to fabricate wavelength-stabilized DBR lasers for quantum technology applications [2].

This work was partially supported by the German Space Agency at DLR with funds provided by the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under grant numbers 50WM2053 and 50WM2152.

Das FBH demonstriert seit Jahrzehnten erfolgreich Laserdioden von 630 nm – 1180 nm mit sehr hoher Leistung. Lediglich der Wellenlängenbereich zwischen 690 nm und 730 nm konnte bislang nicht abgedeckt werden. Zukünftige Anwendungen in Atomuhren und im Bereich der Quantentechnologien erfordern jedoch Laser, die etwa bei 698 nm oder 707 nm emittieren. Allerdings ist die Gitterfehlanpassung von etablierten ternären Verbindungen GaInP (unter 690 nm) und GaAsP (über 730 nm) zu groß, um bei 700 nm eingesetzt zu werden. Diese Lücke im Spektrum lässt sich durch Mischen beider Materialien schließen, was jedoch zu Phasenseparation führen kann.

Um dieses Problem zu beherrschen, haben wir zunächst gitterangepasste GaInAsP-Volumenschichten untersucht. Es zeigte sich, dass sich das Material bei Überschreiten einer kritischen Dicke entmischt. Dies kann bereits in-situ während des Wachstums beobachtet werden und erhöht die Rauigkeit stark. Zugleich verbreitert sich die Emission deutlich und verschiebt sich in den roten Spektralbereich. Durch die genaue Kontrolle von Dicke und Verspannung der Quantengraben lässt sich das jedoch vermeiden. Daher konnten wir nun auch Laserdioden mit konkurrenzfähiger Leistung im Spektralbereich von 690 nm – 730 nm realisieren.

Publications

[1] A. Maaßdorf, D. Martin, H. Wenzel, A. Knigge, M. Weyers, "Growth of compressively strained $\text{GaIn}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ quantum wells for 690–730 nm laser emission", *J. Crystal Growth*, vol. 604, art. 127055 (2023).

[2] H. Wenzel, B. Arar, A. Maaßdorf, J. Fricke, D. Martin, C. Zink, M. Schiemangk, A. Wicht, M. Weyers, A. Knigge, "Distributed Bragg reflector lasers emitting between 696 and 712 nm", *Electron. Lett.*, vol. 58, no. 24, pp. 908–910, doi:10.1049/ell2.12645 (2022).

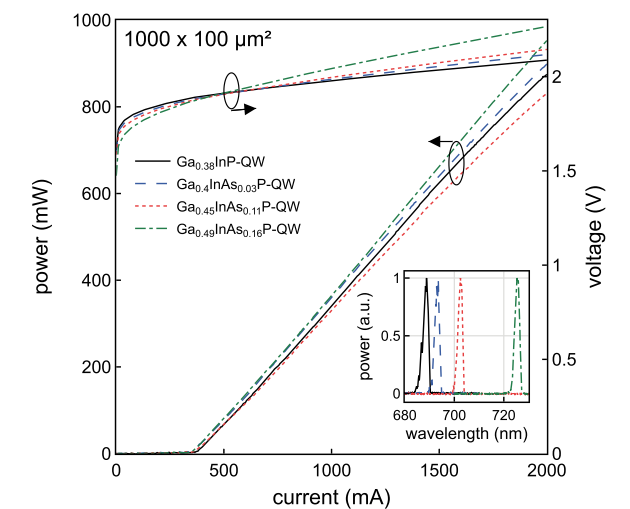


Fig. 3. LIV characteristics of lasers (1 mm long and 100 μm wide, uncoated) with different Ga and As mol fractions in the $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ QW.

Aiming to reduce energy consumption – drift layers for vertical GaN power transistors

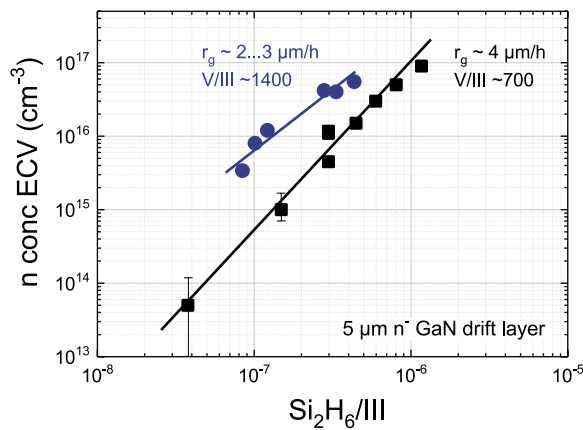


Fig. 1. Drift layer electron concentration measured by ECV as a function of dopant-to-group III precursor supply ratio. Higher V-III ratios are accompanied by a higher n-type background concentration.

A new class of vertical GaN power transistors is to be developed as part of the EU-funded YESvGaN project. Combining the performance of wide band gap (WBG) transistors with the cost advantages of established silicon and sapphire technology are the main driving forces. These transistors are particularly attractive due to their reduced die size compared to current Si-based devices. In addition, lower power conversion losses in energy-hungry applications such as power supplies in data centers or traction inverters for electric vehicles could help to reduce energy consumption.

One key task in the project is to develop vertical drift layers that enable up to 1200V blocking voltage on low-cost silicon or sapphire substrates. The targeted blocking capability demands to epitaxially grow drift layers with a thickness of approximately 10 μm and low but controllable doping. However, the drift region conductivity, in particular for thick n-GaN drift layers, may be limited. Compensational impurity incorporation, a high defect density or built-in potential barriers can directly influence the

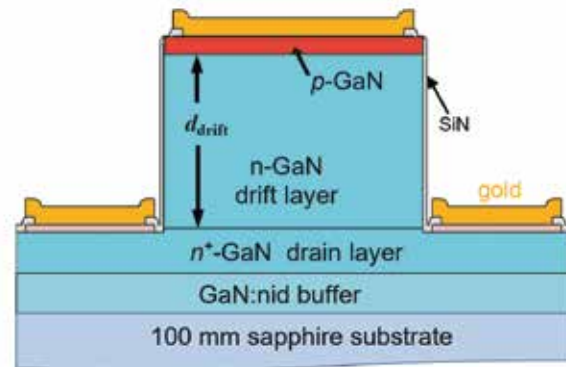


Fig. 2. Schematic of a sapphire-based layer structure and a p-n-diode device concept.

electrical device performance. While epitaxial growth on large-sized Si substrates (up to 8 inch) is developed by the project partners AIXTRON and SILTRONIC AG, the FBH team investigates the device concept based on a 100 mm sapphire technology platform.

For MOVPE growth of GaN on sapphire we use a low-temperature nucleation layer, followed by a high-temperature coalescence step and subsequent growth of undoped and Si-doped GaN layers. Finding a compromise between low buffer layer thickness (short coalescence time) and high material quality (usually requiring a thick buffer and longer coalescence time) was one major optimization task. We could observe that the onset of Si-doping needs to be optimized to avoid pit formation in the early growth stage.

Reproducible low n-type doping in the range of $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ to $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in 5 μm thick GaN:Si films could be achieved (Fig. 1). Main challenges for growth optimization were related to the

trade-off between a low background doping (balancing impurity incorporation), crystalline quality, and a reasonably high growth rate (limited by V-III ratio). Doubling the V-III ratio increases the measured n-type carrier concentration by an order of magnitude most likely by a reduced carbon impurity incorporation. XRD peak broadening analysis proves the overall good material quality of the epitaxial layers. Typical FWHM values are 190 arcsec (0002), 280 arcsec (10–12) and 360 arcsec (30–32). The estimated threading dislocation density is in the range of $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$.

The thermal expansion mismatch between GaN and sapphire (25 %) results in a pronounced convex wafer bow of up to 200 μm for a 10 μm thick layer stack. Further increasing the drift layer thickness thus requires measures to reduce the wafer bow in order to maintain processing capability. We successfully managed to reduce the bow by utilizing stealth laser scribing. The method uses patterning by internally focusing a laser close to the sapphire backside with a pitch size optimized at FBH.

Im EU geförderten Verbundprojekt YESvGaN entwickeln wir gemeinsam mit unseren Partnern neuartige vertikale GaN-Leistungstransistoren auf kostengünstigen Silizium- und Saphirsubstraten. Diese Bauelemente bieten eine geringere Chipfläche bei gleichzeitig hocheffizienter Leistungsumsetzung. Sie könnten daher künftig den Energieverbrauch bei energieintensiven Elektronikanwendungen wie etwa Rechenzentren reduzieren.

Unter anderem werden im Projekt bis zu 10 μm dicke GaN-Driftschichten entwickelt, die eine Sperrspannung von mehr als 1200 V ermöglichen. Mittels MOVPE konnten wir eine reproduzierbar niedrige n-Typ-Dotierung im Bereich von $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ bis $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in 5 μm dicken GaN:Si-Schichten auf 100 mm Saphir-Substraten demonstrieren. Bei der Optimierung des Wachstums mussten wir einen Kompromiss zwischen niedriger Hintergrunddotierung, kristalliner Qualität und angemessenen hohen Wachstumsraten finden. Um die Eigenschaften der n-GaN-Driftregion hinsichtlich Leitfähigkeit und Durchbruchspannung zu bewerten, haben wir eine quasi-vertikale p-n-Diodenstruktur hergestellt. Untersucht wurde die Skalierung der Durchbruchspannung in Abhängigkeit der Si-Dotierung für 5 μm dicke Driftschichten. Durchbruchspannungen von mehr als 900 V wurden erreicht. Um die Durchbruchspannung weiter zu erhöhen, prozessieren wir derzeit Diodenstrukturen mit Driftschichtdicken von bis zu 10 μm.

To assess the MOVPE grown n-GaN drift region properties in terms of forward bias conductivity and reverse bias blocking strength, we used a quasi-vertical p-n-diode structure (Fig. 2). It consists of a highly n-type doped drain layer for ohmic contacting, a 5 μm thick low-doped drift layer and a thin p-type layer.

Breakdown voltage scaling of diodes manufactured on wafers with drift layer doping between $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and a thickness of 5 μm is shown in Fig. 3. Breakdown voltages larger than 900V could be achieved. At higher doping levels the breakdown voltage is limited by parallel plane junction avalanche, while at lower doping levels punch-through breakdown sets the limitation [1]. A good fit to the empirical model presented by Maeda et al. [2] can be seen. The data match those reported for GaN-on-GaN p-n diodes despite using low-cost sapphire substrates.

The “Vertical GaN on Silicon: Wide Band Gap Power at Silicon Cost – YESvGaN” project is funded by the European Union with in the Horizon2020 program under project no: 101007229.

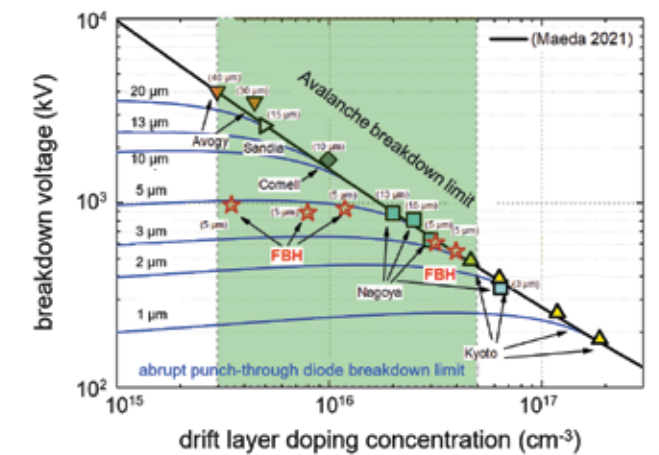


Fig. 3. Quasi-vertical pn-diodes breakdown voltage as function of the drift region carrier concentration. The one-dimensional breakdown empirical charts are calculated from [2]. The green band indicates the drift region specific resistance target.

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, DOI: 10.1109/LED.2023.3234101 (2023).

[2] T. Maeda, T. Narita, S. Yamada, T. Kachi, T. Kimoto, M. Horita, J. Suda, “Impact ionization coefficients and critical electric field in GaN”, J. Appl. Phys. 129, 185702; DOI: 10.1063/5.0050793 (2021).



A unique tool for sputtered iridium gate technology



Fig. 1. Loading the sputter tool with 100 mm wafers clamped on carriers.

To expand the possibilities of our sputtering processes, we have put a new tool into operation that is based on the principle of a quasi-vertical deposition process. This tool was tailored to fit the needs of the sensitive iridium sputtering process of FBH's transistor gate technology and supports further advancement of our GaN MMIC devices. The main goal is to ensure a cross-contamination free process.

Our GaN MMIC process is based on a sputtered iridium gate technology as Schottky barrier metal. This worldwide unique technology significantly reduces dispersion effects and increases the long-term reliability of the active components. Since the sensitive gate process determines the final device performance, the technology is based on a sputtering process that enables a low level of contamination. Most commercially available sputtering systems implement a horizontal sputtering process. In this case, the wafer is either placed at the bottom and the sputter target positioned above it or the target is located at the bottom and the wafer to be processed is placed above and faced

upside down. With regard to cross-contamination, both options are not optimal.

We have therefore realized the concept of a quasi-vertical sputtering system developed together with the German system manufacturer *Aurion Anlagentechnik GmbH*. With a 7° tilt angle, magnetrons and substrates are quasi vertically aligned with the result that generated particles do not interfere. Moreover, substrates are securely held in pockets on carriers. Batches of up to 6 wafers can be loaded, which are processed sequentially (see Fig. 1). The wafers first pass through a preparation chamber, in which the substrates can be heated or sputtered with argon for in situ pretreatment.

Since iridium layers are sensitive to oxygen and moisture that deteriorate the film properties in terms of conductivity, the tool is equipped with cryogenic pumps for efficient moisture removal. To apply sputtered iridium as a Schottky barrier metal in the GaN gate process, conformal coating of etched gate trenches is

important. Fig. 2 shows a sputtered iridium film in an etched gate trench with 130 nm gate length. The film is continuous, smooth and without any voids. The sputtered iridium film exhibits a good top-to-bottom conformality of up to 80 % and a top-to-side conformality up to 68 %. To further improve the filling behavior and grain structure of the thin film, an additional HF bias can be applied to the wafer, leading to superimposed back-sputtering effects.

Beside the filling behavior of the film, a low electrical resistivity is of interest for the gate formation process. With the current deposition process, an electrical resistivity of 0,02 mΩ·cm is achieved. This is a reduction by factor three compared to the previous deposition technique using a horizontal sputter tool, thus demonstrating the potential of the new equipment. The tool is equipped with four DC magnetrons. In addition to iridium, there is the possibility to sputter TiW (10:90wt%) and gold, e.g., for the deposition of seed layers for plating applications. Soon, we will also be able to sputter NiCr (80:20wt%) for the fabrication of thin film resistors.

We gratefully acknowledge financial support from the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

Kürzlich haben wir am FBH eine leistungsfähige Anlage für Sputterprozesse in Betrieb genommen, die gemeinsam mit Aurion Anlagentechnik GmbH entwickelt wurde. Wir nutzen sie insbesondere, um unsere Transistor-Gate-Technologien weiterzuentwickeln; sie ist speziell auf die Anforderungen unserer einzigartigen Iridium-Sputtertechnologie zugeschnitten. Die gesputterten Iridium-Filme nutzen wir als Schottky-Barrieremetal in unserem GaN-MMIC-Prozess. Um den empfindlichen Gate-Prozess so kontaminationsfrei wie möglich zu gestalten, kommt ein quasi-vertikaler Sputterprozess mit 7° Neigungswinkel zum Einsatz. So können die generierten Partikel weder das Substrat noch das Target verunreinigen. Die Anlage bietet zudem die Möglichkeit, die Substrate vor der Abscheidung auszuheizen oder in-situ mittels Argon-Sputtern vorzureinigen. Eine aufwendige Vakuumtechnik aus Turbo-Molekularpumpen mit Kryo-Fallen reduziert dabei effektiv Restgase. Neben Iridium besteht die Möglichkeit, Titan-Wolfram-Legierungen (10:90wt%) zu sputtern sowie Gold für Galvanik-Anwendungen und Nickel-Chrom (80:20wt%) für Dünnschicht-Widerstände abzuschneiden.

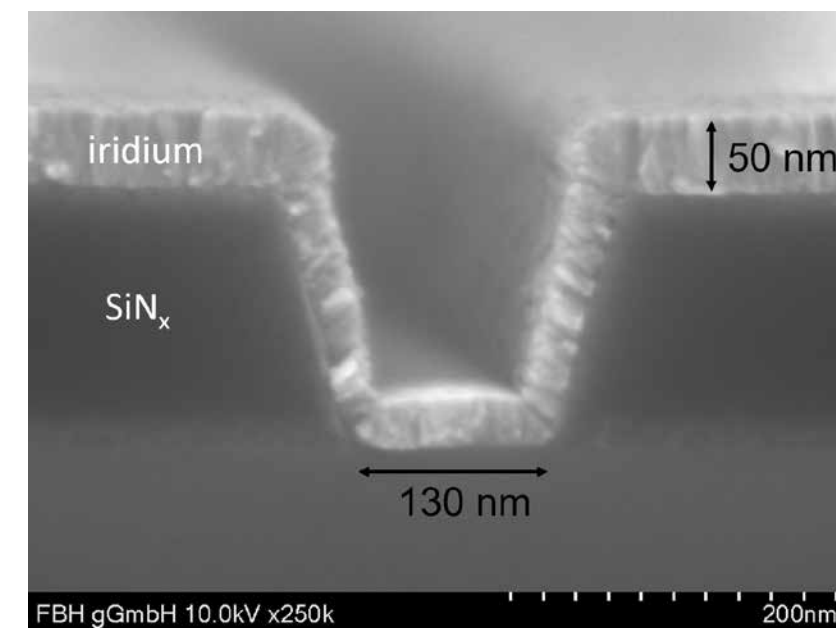


Fig. 2. Gate trench etched in silicon nitride, covered with sputtered iridium.

Publication

I. Ostermay, S. Seifert, O. Krueger, "Optimization of Iridium RF-Sputter Process for AlGaIn/GaN-based HEMT Gate Technology", presented at International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS MANTECH (2023).

MES Go-Live – customizing our digital R&D environment



The MES software allows full connectivity from all devices – from machine control servers to handheld smart devices.

Digitization and the Internet of Things (IoT) are deeply impacting production processes in factories and laboratories worldwide. To this effect, we have introduced a modern Manufacturing Execution System (MES) software that will provide full digital process control and history of every element present on the fabrication floor.

The preparation period culminated in mid-2022 with an adapted MES software environment, a standardized process modeling framework and the schooling of nearly 200 FBH staff. Through the preparation process of gathering master data, implementing use cases and relentless testing, everyone involved has become co-owner of the MES. On first of October, our MES went live in both cleanroom facilities. According to the concept of a soft or “phased” introduction, the MES guides newly started processes in the front-end, while incumbent, paper-based processes are running in parallel. Practically, this will lead to a fade out of old analog-controlled processes, which is expected to be

completed by summer 2023. Other technology departments such as Materials Technology (wafer epitaxy) and Mounting & Assembly are expected to follow suit later.

The change in pace from analog to digital processes is illustrated by Fig. 1, showing the completed wafer count since the go-live: In the first five months, over 1,000 wafers have been completed. We have even developed an intelligent sensor solution (iSensU) to ensure connectivity of legacy equipment without digital interface to the MES (Fig. 2). Usage of the MES is also mirrored by the number of ‘wafer moves’, i.e. the number of processing steps a wafer has experienced. This indicator has increased from nil to approximately 800/week in December 2022 and has topped 2,000 moves/week in February 2023. Meanwhile, more than half of the active processes are being processed via the MES.

For these ‘digital’ lots, all processing meta-data are recorded and stored in the MES databases. Process history and genealogy

can be viewed in the MES user interface with various drill-down features, or they can be exported as reports in common file formats. This being said, the MES still requires significant improvements in software ergonomics, automation, and digital data collection to maximize user satisfaction and leverage all the benefits of a fully digitized processing. The next months will therefore see a gradual shift from establishing custom functionalities required to cover FBH-specific use cases, towards improved user interfaces and automated data collections. Subsequently, quality control features, billing, and controlling will gradually be established within the MES.

Moving the production planning and execution of a research institute from an idiosyncratic and historically grown paper-based system to a common, standardized and fully digitized software is a daring step and a great achievement. Contributions from technology owners, process modelers, and technicians alike as well as active support by the entire FBH management team made this step possible. It was, and still is, a team effort which involved the majority of FBH colleagues. This work was funded by the European Commission under EFRE 1.8/17.

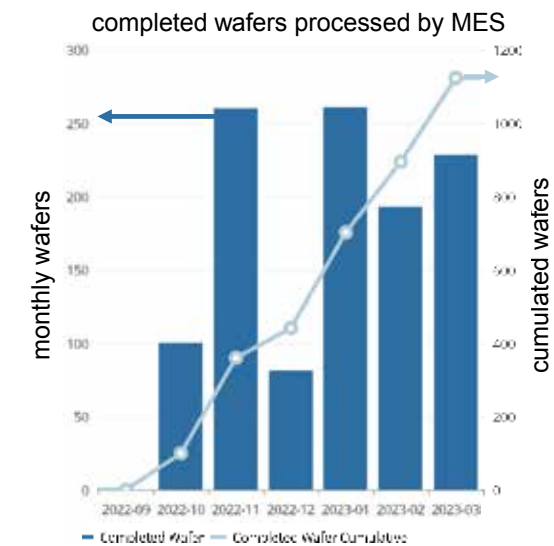


Fig. 1. From analog to digital processes – wafers processed by FBH's newly installed MES.

Das FBH hat ein modernes Manufacturing Execution System (MES) eingeführt, mit dem wir sämtliche Prozesse digital kontrollieren und ihre Historie in der Fertigung erfassen können. Das MES wurde am 1. Oktober in der Abteilung Prozesstechnologie in Betrieb genommen und die analogen schrittweise auf digitale Prozesse umgestellt. Seither wurden über 1.000 Wafer fertiggestellt, mehr als die Hälfte der aktiven Prozesse werden inzwischen über das MES abgewickelt. Das MES-Team arbeitet weiter an Verbesserungen bei der Softwareergonomie, der Automatisierung und der digitalen Datenerfassung, die nun schrittweise umgesetzt werden. So soll nicht nur die Datenaufnahme beschleunigt werden, auch Reporting und Auswertung werden künftig auf Knopfdruck möglich sein. Die erfolgreiche Umstellung von einem papierbasierten System auf eine Software ist eine gemeinschaftliche Teamleistung, zu dem insbesondere Technologieverantwortliche, Prozessmodellierer, Techniker und das FBH-Management beigegeben haben.



Fig. 2. iSensU (intelligent Sensor Unit) provides connectivity to analog sensors, legacy resources, and digital sensors.



Annex Anhang

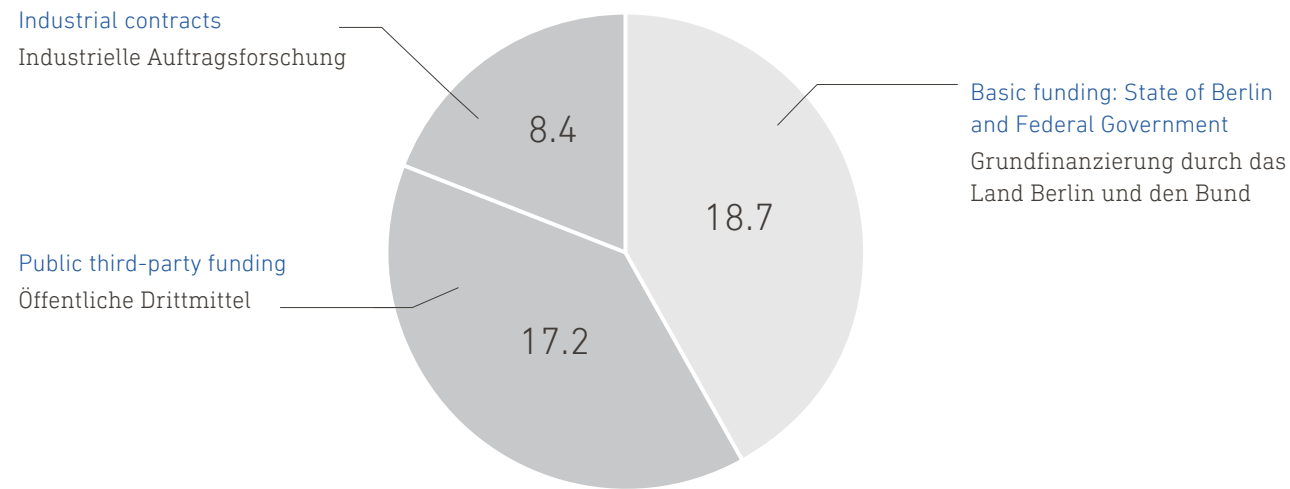
Facts & Figures

Zahlen & Fakten

Founded 1992
Gegründet 1992

Revenue (in million Euros) | Einnahmen (Mio. Euro)

2021

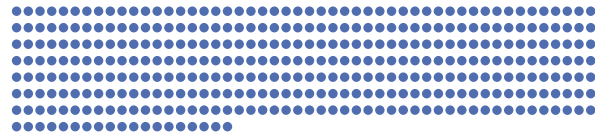


2021

2022

Staff | Team

360 369



Scientists | Wissenschaftlerinnen & Wissenschaftler

159 159



PhD candidates | Promovierende

30 38



Student assistants & bachelor/master students | Studentische Hilfskräfte & Bachelor-/Masterstudierende

28 26

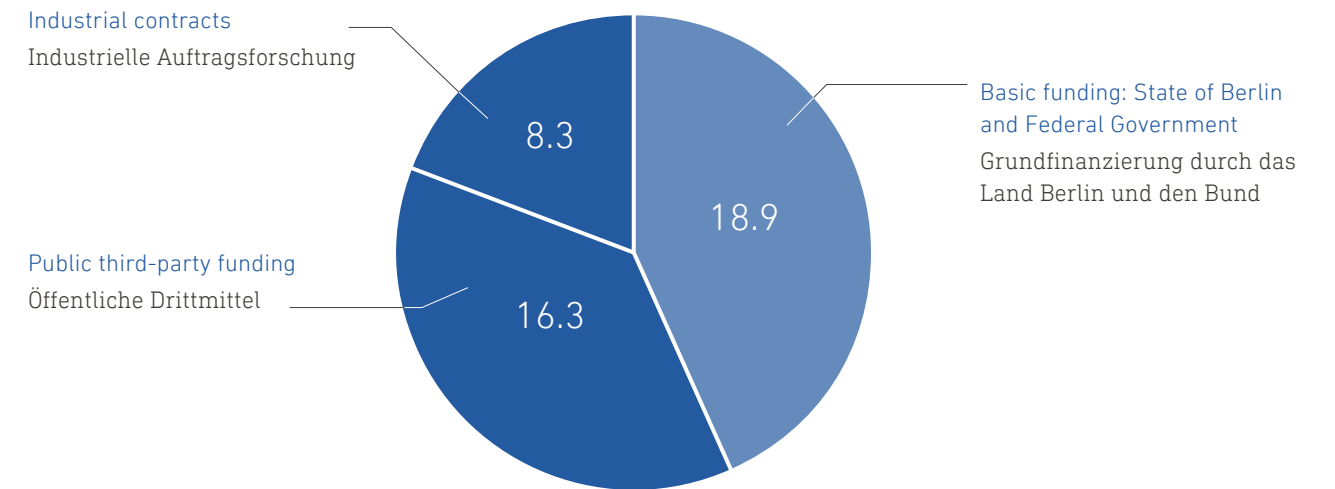


Trainees | Auszubildende

8 8



2022



2021

2022

Third-party funded projects | Drittmittelprojekte

152 179



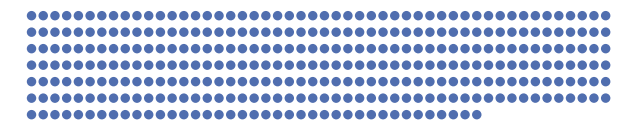
Publications (peer reviewed) | Publikationen (referiert)

84 99



Patents | Patente

327 339



Talks (invited) | Vorträge (eingeladene)

92^{(14)*} 130^{(12)*}



Personnel & Awards

Personalia & Auszeichnungen



Tim Schröder

Tim Schröder is appointed professor for Integrated Quantum Photonics

In November 2022, the head of the Joint Lab Diamond Nanophotonics was promoted to a permanent W3 professorship at Humboldt-Universität zu Berlin. Tim Schröder's research combines fundamental physical concepts with future device technology. These are designed to provide the basis for turnkey quantum technological devices used in real-world applications in quantum sensing, quantum security, and quantum information processing.

For several years, he has been introducing his research to a wider audience. Tim Schröder has already answered questions from interested parties about quantum technologies several times at **Book a Scientist** under the motto "Technology with glamour factor – what diamonds have to do with quantum technologies". In the series of events organized by the Leibniz Association, people curious about scientific topics can book exclusive short talks with scientists. Tim Schröder also shared his expertise at **Physics & Pizza** – this time in front of the interested public and young scientists of the German Physical Society. In this talk, he addressed the quantum internet and explained what is needed to make it work

Tim Schröder übernimmt Professur für Integrierte Quantenphotonik

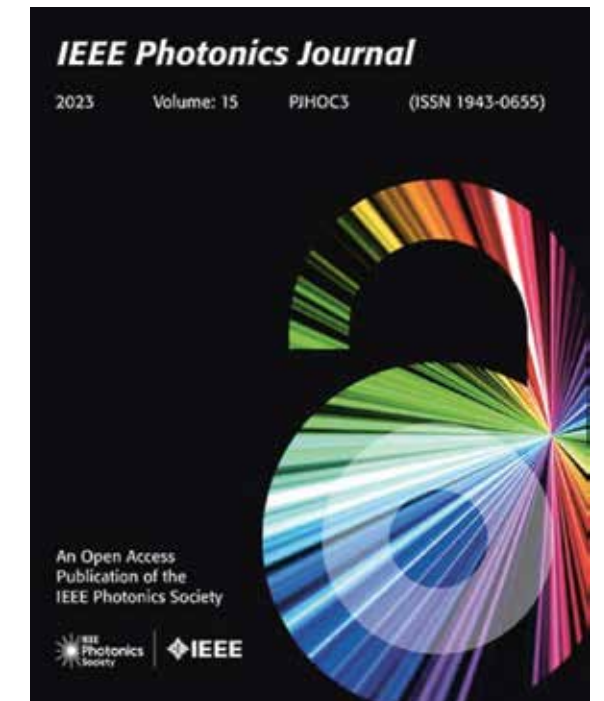
Im November 2022 wurde der Leiter des Joint Lab Diamond Nanophotonics auf eine W3-Professur auf Lebenszeit an der Humboldt-Universität zu Berlin berufen. Tim Schröder verbindet mit seinen Forschungsarbeiten grundlegende physikalische Ideen mit zukünftiger Gerätetechnik. Diese sollen die Basis für schlüsselfertige quantentechnologische Geräte liefern, die in realen Anwendungen in der Quantensensorik, Quantensicherheit und Quanteninformationsverarbeitung eingesetzt werden.

Seit mehreren Jahren macht er seine Forschung auch einem breiteren Publikum verständlich. Unter dem Motto „Technologie mit Glamourfaktor – was Diamanten mit Quantentechnologien zu tun haben“ hat Tim Schröder bei **Book a Scientist** schon mehrfach die Fragen von Interessierten rund um Quantentechnologien beantwortet. In der Veranstaltungsreihe der Leibniz-Gemeinschaft haben Menschen mit Neugier an wissenschaftlichen Themen die Möglichkeit, exklusive Kurzgespräche mit Wissenschaftler*innen zu buchen. Auch bei **Physics & Pizza** hat er sein Wissen bereits geteilt – diesmal vor der interessierten Öffentlichkeit und dem Nachwuchs der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Thema seines Vortrags war das Quanteninternet und was nötig ist, damit es funktioniert.

Paul Crump – internationally connected and in close scientific exchange

Over the past few years, Paul Crump, who heads the High-Power Diode Lasers Lab at FBH, has supported professional exchange in numerous roles. He is, among other things, senior editor of the Photonics Journal and was responsible for a special issue of the journal in early 2023.

As Chair, Paul Crump was, among others, a member of the Steering Committee of the CLEO Europe Conference, where the European optics and photonics community met to network and exchange ideas. He also served as Chair of the Semiconductor Lasers Sub-Committee of CLEO USA for two years and is a member of the Steering Committee. Likewise, he acted as a Committee Member for the High Power Diode Laser Technology Conference at Photonics West 2023 and was Session Chair for this event as well. In his third and final year as Globalization Chair of the IEEE Photonics Society, he organized the first Special Symposium on Globalization in Photonics Research & Development at the IEEE Photonics Conference. FBH also presented numerous scientific papers at each of these conferences.



Paul Crump – international vernetzt und im intensiven wissenschaftlichen Austausch

Ein Wissenschaftler, der den fachlichen Austausch in den letzten Jahren in vielfältigen Funktionen unterstützt hat, ist Paul Crump, der am FBH das High-Power Diode Lasers Lab leitet. Unter anderem ist er Senior Editor des Photonics Journal und verantwortete Anfang 2023 eine Sonderausgabe des Journals.

Als Chair war Paul Crump unter anderem Mitglied des Steering Committees der CLEO Europe Konferenz, auf der sich die europäische Optik- und Photonik-Community fachlich austauschte. Er agierte zudem zwei Jahre lang als Chair des Semi-

conductor Lasers Sub-Committees der CLEO USA und ist Mitglied des Steering Committees. Ebenfalls als Committee Mitglied fungierte er bei der High Power Diode Laser Technology Konferenz im Rahmen der Photonics West 2023 und war auch hier Session Chair. Im dritten und letzten Jahr seiner Funktion als Globalization Chair der IEEE Photonics Society organisierte er das erste Special Symposium on Globalization in Photonics Research & Development der IEEE Photonics Conference. Auf all diesen Konferenzen präsentierte sich das FBH zudem mit zahlreichen wissenschaftlichen Vorträgen.



Paul Crump presents the work of the Globalization Committee at the IEEE Photonics Conference. Paul Crump stellt bei der IEEE Photonics Conference die Arbeit des Globalization Committees vor.



Oliver Hilt

Change of leadership in power electronics

Oliver Hilt took over as head of the former Power Electronics Department on May 1, 2022. He replaced Joachim Würfl, who had retired. In the same process, the Power Electronics Labs were merged into the new Wide-Bandgap Electronics Department. Oliver Hilt has been working at the Ferdinand-Braun-Institut since 2006, developing predominantly GaN switching transistors for high-voltage applications.

Führungswechsel in der Leistungselektronik

Oliver Hilt leitet seit dem 1. Mai 2022 das bisherige Department Leistungselektronik. Er löste damit Joachim Würfl ab, der in den Ruhestand gegangen ist. In diesem Zuge wurden die Labs der Leistungselektronik im neuen Wide-Bandgap Electronics Department zusammengeführt. Oliver Hilt arbeitet bereits seit 2006 am Ferdinand-Braun-Institut und entwickelt hauptsächlich GaN-Schalttransistoren für Hochspannungsanwendungen.

Newly qualified Bachelor Professional of Metal Production and Management at FBH

The precision mechanics workshop at the Ferdinand-Braun-Institut can now rely on the combined expertise of two professionals in metal production. In addition to workshop manager Daniel Bandke, who received his diploma years ago, Michelle Schulz has successfully completed her further training to become a Bachelor Professional of Metal Production and Management. The trained industrial mechanic continues to support the Prototype Engineering Lab at FBH in the precision engineering workshop. She manufactures prototypes and other customized solutions there both for research and customers as part of the 8-person team.



Michelle Schulz

Frisch gebackene Industriemeisterin Metall am FBH

Michelle Schulz ist neben Werkstattleiter Daniel Bandke die zweite Fachkraft mit Meistertitel am FBH. Die gelernte Industriemeisterin Metall Anfang 2022 erfolgreich abgeschlossen. Sie unterstützt das Entwicklungszentrum am FBH weiterhin in

der feinmechanischen Werkstatt. Dort fertigt sie in dem 8-köpfigen Team Prototypen und andere individuelle Lösungen für den Forschungsbetrieb und für Kunden.

FBH team receives Big Laser Award at ISLC 2022

Seven FBH scientists were honored with the Big Laser Award in October 2022. The prize was granted for the highest presented achievement at the "International Semiconductor Laser Conference" (ISLC) in Japan. With this award, the jury honored the paper "2 kW Pulse Power from Internal Wavelength Stabilized Diode Laser Bar for LiDAR Applications" authored by Andrea Knigge, Nor Ammouri, Heike Christopher, Johannes Glaab, Armin Liero, Jörg Fricke, and Hans Wenzel. During their talk, the researchers presented the concept of a diode laser bar with a pulse driver that provides an improved signal-to-noise ratio in LiDAR systems.

FBH-Team erhält Big Laser Award der ISLC 2022

Sieben Wissenschaftler*innen des FBH wurde im Oktober 2022 der Big Laser Award verliehen. Der Preis wurde für die höchste präsentierte Leistung auf der „International Semiconductor Laser Conference“ (ISLC) in Japan vergeben. Die Jury würdigt damit das Paper „2kW Pulse Power from Internal Wavelength Stabilized Diode Laser Bar for LiDAR Applications“ von Andrea Knigge, Nor Ammouri, Heike Christopher, Johannes Glaab, Armin Liero, Jörg Fricke und Hans Wenzel. Bei ihrem Vortrag präsentierten die Forscher*innen das Konzept eines Diodenlaserbarrens mit Pulstreiber, das für ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis in LiDAR-Systemen sorgt.

Program Chair Paul O. Leisher (right) presents the "Big Laser Award" certificate to Andrea Knigge from the FBH (left) at the conference in Japan. Programmchair Paul O. Leisher (re.) überreicht Andrea Knigge vom FBH (li.) auf der Konferenz in Japan die Urkunde des „Big Laser Award“.



FBH Paper is Editor's Choice 2022 of the IEEE Photonics Journal

The IEEE Photonics Journal has chosen the paper "60 % Efficient Monolithically Wavelength-Stabilized 970-nm DBR Broad-Area Lasers" as 2022 Editor's Choice. The open-access publication by Paul Crump, Mohammed Jarez Miah, Martin Wilkens, Jörg Fricke, Hans Wenzel, and Andrea Knigge describes the progress made at Ferdinand-Braun-Institut in high-power diode lasers. The paper is an expanded version of a selected post-deadline paper from the closing presentation at the 2021 International Semiconductor Laser Conference. It also opens the special issue of the IEEE Photonics Journal on semiconductor lasers.

FBH-Paper ist Editor's Choice 2022 des IEEE Photonics Journals

Das IEEE Photonics Journal hat das Paper "60 % Efficient Monolithically Wavelength-Stabilized 970-nm DBR Broad-Area Lasers" als Editor's Choice 2022 ausgewählt. Die Open-Access-Publikation von Paul Crump, Mohammad Jarez Miah, Martin Wilkens, Jörg Fricke, Hans Wenzel und Andrea Knigge beschreibt die am Ferdinand-Braun-Institut erreichten Fortschritte bei Hochleistungsdiodenlasern. Es handelt sich dabei um eine erweiterte Fassung eines ausgewählten Post-Deadline-Papers aus der Schlusspräsentation der International Semiconductor Laser Conference 2021. Zudem eröffnet es die Sonderausgabe des IEEE Photonics Journals zum Thema Halbleiterlaser.

Paper on optimized 233 nm UV LEDs among top APL publications

The paper "Milliwatt power 233 nm AlGaIn-based deep UV-LEDs on sapphire substrates" by Neysha Lobo Ploch, Frank Mehnke, Luca Sulmoni, Hyun Kyong Cho, Martin Guttmann, Johannes Glaab, Katrin Hilbrich, Tim Wernicke, Sven Einfeldt, and Michael Kneissl has made it into the top 10 "Trending Articles" of Applied Physics Letters (APL). These are particularly frequently downloaded and much discussed articles published in the journal. The publication is the result of a collaboration between FBH, TU Berlin, and UVphotonics. It deals with technologically improved processes in the development of UV LEDs. The optimizations ensure significantly higher output power and efficiency of the light-emitting diodes.

FBH publication selected as Editor's Pick

The publication "Comparison of individual and common wavelength-operation for 785 nm Y-branch DBR ridge waveguide diode lasers with adjustable spectral distance" was also recognized. It is the Editor's Pick of the Applied Optics journal and was submitted by the authors Lara Sophie Theurer, Bernd Sumpf, Martin Maiwald, André Müller, Jörg Fricke, Peter Ressel, Andrea Knigge, and Günther Tränkle. Applied Optics thereby honors papers of "outstanding scientific quality that are representative for the work in a particular field."

nature journal: results published on antiseptic efficacy and skin tolerance of a UVC LED irradiation system

A UVC LED system with an emission wavelength of 233 nm developed at FBH was successfully tested for medical applications. The measurements were performed by medical partners using skin models and tissue samples. The results were published in the nature journal "Scientific Reports". This study showed that the emitter was able to significantly reduce the amount of multi-resistant pathogens such as MRSA on the skin – without causing lasting damage.

Best Poster Award at the PhoenixD LaserDay 2022 Conference

With the Best Poster Award, the jury of the PhoenixD LaserDay 2022 conference honored Janpeter Hirsch for his poster "Micro-integrated semiconductor laser modules for precision spectroscopy applications".

Best Poster Award bei der PhoenixD LaserDay 2022 Konferenz

Mit dem Best Poster Award zeichnete die Jury der PhoenixD LaserDay 2022 Konferenz Janpeter Hirsch für sein Poster „Micro-integrated semiconductor laser modules for precision spectroscopy applications“ aus.

UVC LED system that was used for the medical tests, showing the irradiation unit.

UVC-LED-Strahler, der die Bestrahlungseinheit zeigt und für die medizinischen Tests eingesetzt wurde.

Paper zu optimierten 233 nm UV-LEDs unter den Top-Veröffentlichungen bei APL

Das Paper „Milliwatt power 233 nm AlGaIn-based deep UV-LEDs on sapphire substrates“ von Neysha Lobo Ploch, Frank Mehnke, Luca Sulmoni, Hyun Kyong Cho, Martin Guttmann, Johannes Glaab, Katrin Hilbrich, Tim Wernicke, Sven Einfeldt und Michael Kneissl hat es in die Top 10 der „Trending Articles“ bei Applied Physics Letters (APL) geschafft. Dabei handelt es sich um besonders häufig heruntergeladene und viel diskutierte Artikel des Journals. Die Publikation ist in Zusammenarbeit des FBH, der TU Berlin und UVphotonics entstanden und beschäftigt sich mit technologisch verbesserten Prozessen bei der Entwicklung von UV-LEDs. Die Optimierungen sorgen für eine deutlich höhere Ausgangsleistung und Effizienz der Leuchtdioden.

FBH-Publikation als Editor's Pick ausgewählt

Ausgezeichnet wurde auch die Publikation "Comparison of individual and common wavelength-operation for 785 nm Y-branch DBR ridge waveguide diode lasers with adjustable spectral distance". Sie ist Editor's Pick des Journals Applied Optics und stammt von Lara Sophie Theurer, Bernd Sumpf, Martin Maiwald, André Müller, Jörg Fricke, Peter Ressel, Andrea Knigge und Günther Tränkle. Applied Optics zeichnet damit Artikel von „hervorragender wissenschaftlicher Qualität aus, die repräsentativ für die Arbeit in einem bestimmten Bereich sind“.

nature-Journal: Ergebnisse zu antiseptischer Wirksamkeit und Hautverträglichkeit eines UVC-LED-Strahlers veröffentlicht

Ein am FBH entwickelter UVC-LED-Strahler mit einer Emissionswellenlänge von 233 nm wurde erfolgreich für medizinische Anwendungen getestet. Die Messungen wurden von medizinischen Partnern anhand von Hautmodellen und Gewebeproben durchgeführt. Veröffentlicht wurden die Ergebnisse im Journal „Scientific Reports“ aus dem Hause nature. Darin wurde gezeigt, dass der Strahler die Menge multi-resistenter Keime wie MRSA auf der Haut deutlich reduzieren konnte – ohne diese nachhaltig zu schädigen.



Events Veranstaltungen



Participants of the Quantum Future Academy 2022 from all over Europe after their lab tour at the Ferdinand-Braun-Institut. Die Teilnehmenden der Quantum Future Academy 2022 aus ganz Europa nach ihrer Labtour am Ferdinand-Braun-Institut.

Conferences, workshops & a junior academy

Starting in 2022, most of the trade fairs and conferences were held in presence again after several years of break. FBH presented its complete range of products and R&D advances at a wide variety of international events. For example, the institute was represented with several contributions at the **ICMOVPE** conference, where the latest developments and applications of metal organic vapor phase epitaxy were discussed. At the **International Workshop on Nitride Semiconductors**, the Joint Lab GaN Optoelectronics and the Department of Materials Technology also participated with several contributions. The head of the Joint Lab GaN Optoelectronics, Michael Kneissl, was co-chairman of the multi-day workshop.

FBH brought its research to international attention on numerous other platforms in 2022. These included conferences such as the International Semiconductor Laser Conference (ISLC), the International Microwave Symposium (IMS), the Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE-EXMATEC), the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS Mantech), and the International Workshop on UV Materials and Devices

(IWUMD) as well as the digital conference "Vertrauenswürdige Elektronik" (Trusted Electronics) organized by the Federal Research Ministry BMBF.

Advanced UV for Life e.V. and the photonics network OptecBB organized a **thematic workshop on disinfection with UV radiation** at FBH. New findings and technical developments of environmentally friendly UV LEDs were presented and discussed.

Inspiring the next generation of European scientists for quantum technologies – Quantum Future Academy

In August 2022, the Quantum Future Academy attracted students from 29 European countries to Berlin. This year's hosts were Ferdinand-Braun-Institut and Humboldt-Universität zu Berlin. The event, which took place over several days, offered a wide-ranging program of lectures, workshops, and lab tours – visits of the young scientists also included FBH's cleanrooms. This way, BMBF's Young Scientists Academy provided students with intensive insights into quantum technologies and their great potential for future applications.

Konferenzen, Workshops & eine Nachwuchsakademie

Nach mehrjähriger Pause fanden ab 2022 wieder die meisten Fachmessen und Konferenzen in Präsenz statt. Auf den verschiedensten internationalen Events präsentierte das FBH sein komplettes Leistungsspektrum und F&E-Fortschritte. So war das Institut mit mehreren Beiträgen auf der **ICMOVPE**-Konferenz vertreten, auf der über neueste Entwicklungen und Anwendungen der metallorganischen Gasphasenepitaxie diskutiert wurde. Beim **International Workshop on Nitride Semiconductors** beteiligten sich das Joint Lab GaN Optoelectronics und das Department Materialtechnologie ebenfalls mit mehreren Beiträgen. Der Leiter des Joint Lab GaN Optoelectronics, Michael Kneissl, war Co-Chairman des mehrtägigen Workshops.

Das FBH machte seine Forschung 2022 international auf zahlreichen weiteren Plattformen sichtbar. Dazu zählten Fachkonferenzen wie etwa die International Semiconductor Laser Conference (ISLC), das International Microwave Symposium (IMS), der Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE-EXMATEC), die International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS Mantech) oder der International Workshop on UV

Materials and Devices (IWUMD) ebenso wie die vom BMBF organisierte digitale Fachkonferenz "Vertrauenswürdige Elektronik".

Advanced UV for Life e.V. und das Photonik-Netzwerk OptecBB organisierten am FBH zudem einen **Themenworkshop über die Desinfektion mit UV-Strahlung**. Vorgestellt und diskutiert wurden neue Erkenntnisse und technische Weiterentwicklungen der umweltfreundlichen UV-LEDs.

Den europäischen Nachwuchs für Quantentechnologien begeistern – Quantum Future Academy

Im August 2022 zog die Quantum Future Academy Studierende aus 29 Ländern Europas nach Berlin. Gastgeber waren in diesem Jahr das Ferdinand-Braun-Institut sowie die HU Berlin. Die mehrtägige Veranstaltung bot ein breit gefächertes Programm aus Vorträgen, Workshops und Labortouren – unter anderem besichtigten die Nachwuchswissenschaftler*innen die Reinräume des FBH. Auf diese Weise ermöglichte die Nachwuchsakademie des BMBF intensive Einblicke in die Quantentechnologien und ihr großes Potenzial für künftige Anwendungen.



🔗 FBH presented its developments at Laser World of Photonics. Das FBH stellt seine Entwicklungen bei der Laser World of Photonics vor.



🔗 During the ILA press tour, Günther Tränkle (right) explained FBH developments for space applications to Brandenburg's Minister President Dietmar Woidke (left) and Berlin's Governing Mayor Franziska Giffey (center). Beim Presserundgang auf der ILA erklärte Günther Tränkle (re.) dem Brandenburgischen Ministerpräsidenten Dietmar Woidke (li.) und der Regierenden Bürgermeisterin von Berlin, Franziska Giffey (m.), die FBH-Entwicklungen für Weltraum-Anwendungen.

Internationally visible at trade fairs

The trade show year 2022 began for the Ferdinand-Braun-Institut in April with the **Laser World of Photonics** in Munich. The institute once again presented its entire range of products at this leading trade fair for the laser and photonics industry. Highlights included LiDAR pulse laser sources with 2 kW output power, robust lasers for space applications, and RGB laser modules for holographic laser printers in medicine. FBH also presented a similar program at **Photonics West** in San Francisco right at the beginning of 2023. The institute underlined its expertise in 19 presentations at the accompanying conferences and in sessions led by FBH scientists.

Auf Fachmessen international sichtbar

Begonnen hatte das Messejahr 2022 für das Ferdinand-Braun-Institut im April mit der **Laser World of Photonics** in München. Das Institut präsentierte auf dieser Leitmesse für die Laser- und Photonikbranche erneut sein gesamtes Leistungsspektrum. Zu den Highlights zählten LiDAR-Pulslaserquellen mit 2 kW Ausgangsleistung, robuste Laser für Weltraum-Anwendungen und RGB-Lasermodule für holografische Laserdrucker in der Medizin. Mit einem ähnlichen Programm zeigte sich das FBH auch auf der **Photonics West** in San Francisco direkt zu Beginn des Jahres 2023. Seine Expertise unterstrich das Institut in 19 Vorträgen auf den begleitenden Konferenzen und in Sessions, die von FBH-Wissenschaftler*innen geleitet wurden.

FBH also attended numerous other trade fairs. It presented the complete value chain of its developments for applications in space, on satellites and in quantum technology to visitors at the Berlin **International Aerospace Exhibition (ILA)** in June 2022. A few months later, the institute appeared at the **Space Tech Expo** in Bremen with its robust and reliable laser modules. Exhibits included pump lasers for the MERLIN climate satellite as well as laser modules that will be used on the International Space Station ISS in the future. At the **Photonics Days**, FBH also showcased its UVC LEDs, which are already being used against multi-resistant pathogens and coronaviruses.

The collaborative project iCampus presented its developments at the **Sensor + Test**. FBH exhibited its mobile Raman measurement system at the booth, which can be used for on-site measurements on selected substances and does not require using a spectrometer of any kind.

Experience research first hand

During the **Science Night**, FBH's program attracted more than 600 interested visitors to the institute. The hands-on experiments and guided tours inspired both children and adults. Guests took a tour through laboratories in cleanroom suits or marveled at the sophisticated workpieces manufactured by the precision mechanics workshop for research operation. They found out how UV LEDs can be used to combat pathogens or how adulterated alcohol can be identified with light. The smallest ones piled up laser stacks or looked through a microscope at tiny structures. The **Nacht der kreativen Köpfe** (Night of Creative Minds) also offered experiments in Cottbus. FBH presented current developments together with its partners from the iCampus project under the motto "Future". The institute presented its Raman sensor system there, which can be used to clearly identify substances.



Darüber hinaus war das FBH auf zahlreichen weiteren Messen vertreten. Es präsentierte den Besuchern der **Internationalen Luft- und Raumfahrttausstellung (ILA)** in Berlin im Juni 2022 die komplette Wertschöpfungskette seiner Entwicklungen für Anwendungen im Weltraum, auf Satelliten und in der Quantentechnologie. Wenige Monate später trat das Institut mit seinen robusten und zuverlässigen Lasermodulen auf der **Space Tech Expo** in Bremen auf. Zu den Exponaten zählten Pumplaser für den Klimasatelliten MERLIN ebenso wie Lasermodule, die künftig auf der internationalen Raumstation ISS eingesetzt werden. Bei den **Photonics Days** stellte das FBH zudem seine UVC-LEDs aus, die bereits gegen multi-resistente Krankheitserreger und Coronaviren eingesetzt werden.

Das Verbundprojekt iCampus präsentierte seine Entwicklungen auf der **Sensor + Test**. Am Messestand stellte das FBH sein mobiles Raman-Messsystem vor, das für Vor-Ort-Messungen von ausgewählten Substanzen eingesetzt werden kann und ganz ohne Spektrometer auskommt.

Girls starting from fifth grade experienced research first hand during **Girls' Day**. For one day, they slipped into the role of a microtechnologist. The girls visited special laboratories and examined tiny lasers under a microscope – with FBH's trainees always on hand to answer questions about the institute's high-tech research. At the **digital parents' evening**, parents and their kids learned more about training in microtechnology and working at the Ferdinand-Braun-Institut. This was where they found answers to all their questions about training opportunities at FBH.

Political Berlin was also interested in our research. In August, **Science Senator Ulrike Gote** visited FBH with colleagues from the Senate Administration. She had a look into laboratories and learned more about semiconductor technologies – from basic research to applications in health, space, and quantum technologies.

☞ Andreas Wicht, head of the Integrated Quantum Technology research area, demonstrates to Senator Gote how research processes can be tested in a virtual environment and significantly shortened with the help of augmented reality.

Hier demonstriert Andreas Wicht, Leiter des Forschungsbereichs Integrierte Quantentechnologie, Senatorin Gote, wie sich Forschungsprozesse in einem virtuellen Umfeld testen und mithilfe von Augmented Reality deutlich verkürzen lassen.



☞ Steering a laser beam through a maze of mirrors and lenses at the Science Night or stacking laser piles for the younger ones – there was plenty of action for everyone!

Bei der Langen Nacht der Wissenschaften einen Laserstrahl durch ein Labyrinth aus Spiegeln und Linsen lenken oder Laserstack-Stapeln für die Jüngeren – es war für alle was dabei!



Forschung hautnah erleben

Zur **Langen Nacht der Wissenschaften** lockte das Programm des FBH mehr als 600 Interessierte in das Institut. Die Mitmach-Experimente und Führungen begeisterten sowohl Kinder als auch Erwachsene. So konnten die Gäste im Reinraumanzug Labore besichtigen oder die anspruchsvollen Werkstücke bestaunen, die die feinmechanische Werkstatt für den Forschungsbetrieb fertigt. Sie ließen sich erklären wie man mit UV-LEDs Krankheitserreger bekämpfen oder gepanschten Alkohol mit Licht identifizieren kann. Die Kleinsten stapelten Laserstacks oder schauten durchs Mikroskop auf winzige Strukturen. Experimente gab es auch bei der **Nacht der kreativen Köpfe** in Cottbus. Unter dem Motto „Zukunft“ präsentierte das FBH gemeinsam mit den Partnern im iCampus-Projekt aktuelle Entwicklungen. Es stellte dort sein Raman-Sensorsystem vor, mit dem sich Stoffe eindeutig nachweisen lassen.

Forschung hautnah erlebten auch Mädchen ab der fünften Klasse beim **Girls'Day**. Für einen Tag lang schlüpfen sie in die Rolle einer Mikrotechnologin. So konnten die Mädchen Speziallabore besichtigen und winzig kleine Laser mit dem Mikroskop untersuchen. Die Azubis aus dem FBH standen Rede und Antwort bei Fragen rund um die Hightech-Forschung am Institut. Mehr zur Ausbildung in der Mikrotechnologie und zur Arbeit am Ferdinand-Braun-Institut erfuhren Eltern und Schüler*innen beim **digitalen Elternabend**. Dort erhielten sie Antworten auf sämtliche Fragen rund um das Thema Ausbildung am FBH.

Auch das politische Berlin interessierte sich für unsere Forschung. Im August besuchte **Wissenschaftssenatorin Ulrike Gote** mit Kolleg*innen aus der Senatsverwaltung das FBH. Sie warf einen Blick in Labore und informierte sich über Halbleitertechnologien – von den Grundlagen bis hin zu Anwendungen in den Bereichen Gesundheit, Weltraum- und Quantentechnologien.



Structure of the Institute Institutstruktur

The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organizes its research activities in labs and departments within its four research areas: photonics, integrated quantum technology, III-V electronics, and III-V technology. Here, FBH cooperates closely with universities in the framework of joint labs. With its Science Management, the institute provides an interface between science, industry, and education/training. The department coordinates various networking projects in the high-tech field and is also responsible for administration and IT services. An efficient, process-oriented quality management system and the communications unit complement FBH competencies. The technical services team ensures the smooth operation of laboratories and cleanrooms.

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 97 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.

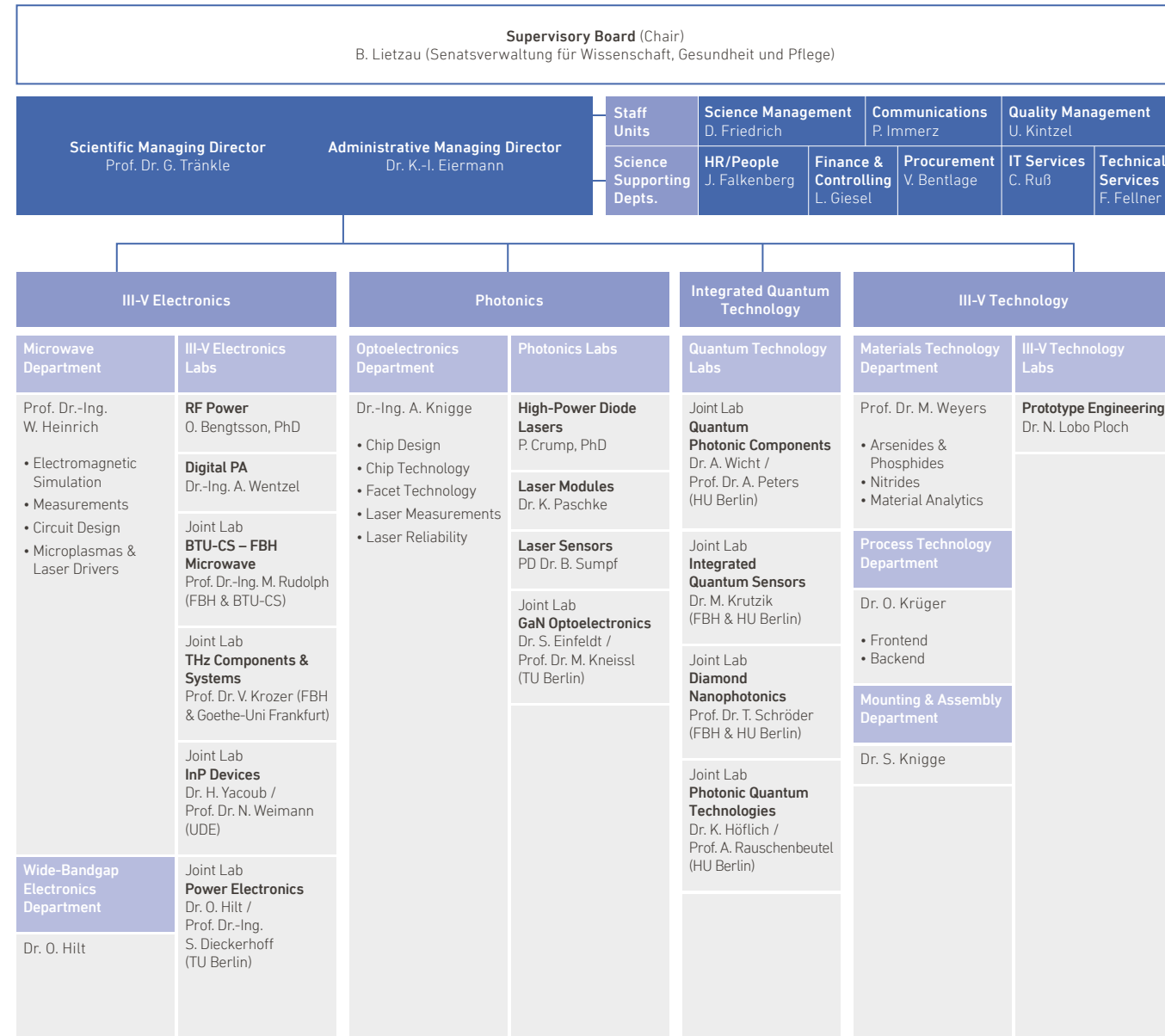
Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organisiert seine Forschungsaktivitäten in Labs und Departments in den vier Forschungsbereichen Photonik, integrierte Quantentechnologie, III/V-Elektronik und III/V-Technologie. Hierbei kooperiert das FBH im Rahmen von Joint Labs eng mit Universitäten. Mit seinem Wissenschaftsmanagement verfügt das Institut über eine Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Bildung. Hier werden verschiedene Vorhaben zur Vernetzung im Hochttechnologie-Bereich koordiniert; das Department ist zudem für die Verwaltung und IT-Services zuständig. Der Stab wird ergänzt durch ein effizientes, prozessorientiertes Qualitätsmanagement und den Bereich Kommunikation. Für den reibungslosen Betrieb der Labore und Reinräume sorgt das Team der Technischen Dienste.

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 97 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

Dr. Patrick Scheele
 HENSOLDT Sensors GmbH, Ulm (until/bis 31.03.2023)

Members | Mitglieder

- | | |
|---|---|
| Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bösch
Technische Universität Graz (A) (until/bis 31.03.2023) | Dr. Kolja Nicklaus
Space Tech GmbH, Immenstaad |
| Dr. Franz Dielacher
Villach (A) | Dr. Berthold Schmidt
TRUMPF GmbH & Co. KG, Ditzingen |
| Prof. Dr. Friedel Gerfers
Technische Universität Berlin | Dr. Ulrich Steegmüller
Aledia, Échirolles (FR) (until/bis 31.03.2023) |
| Prof. Dr. Ulrike Grossner
ETH Zürich (CH) | Prof. Jelena Vuckovic
Stanford University (USA) (until/bis 31.03.2023) |
| Dr. Siegbert Martin
Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang | |

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
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(until/bis 07.07.2023) | Dr. Ramona Eberhardt
Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena |
| MinDirig Engelbert Beyer – stellvertretender Vorsitzender
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(as of /seit 08.07.2023) | Dr. Annika Lange
Senatsverwaltung für Finanzen, Berlin
(until/bis 30.09.2022) |
| Marina Bauer
Senatsverwaltung für Finanzen, Berlin
(as of/seit 01.10.2022) | Sylvia Richter
Infineon Technologies AG, Neubiberg |
| Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth
Universität Stuttgart | Dr. Christian Schmitz
TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen (until/bis 30.06.2023) |
| | Dr. Hagen Zimer
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. rer. nat. Günther Tränkle

Phone +49.30.6392-2601
guenther.traenkle@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. rer. nat. Günther Tränkle

Phone +49.30. 6392-2601
guenther.traenkle@fbh-berlin.de

III-V Electronics | III/V-Elektronik
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

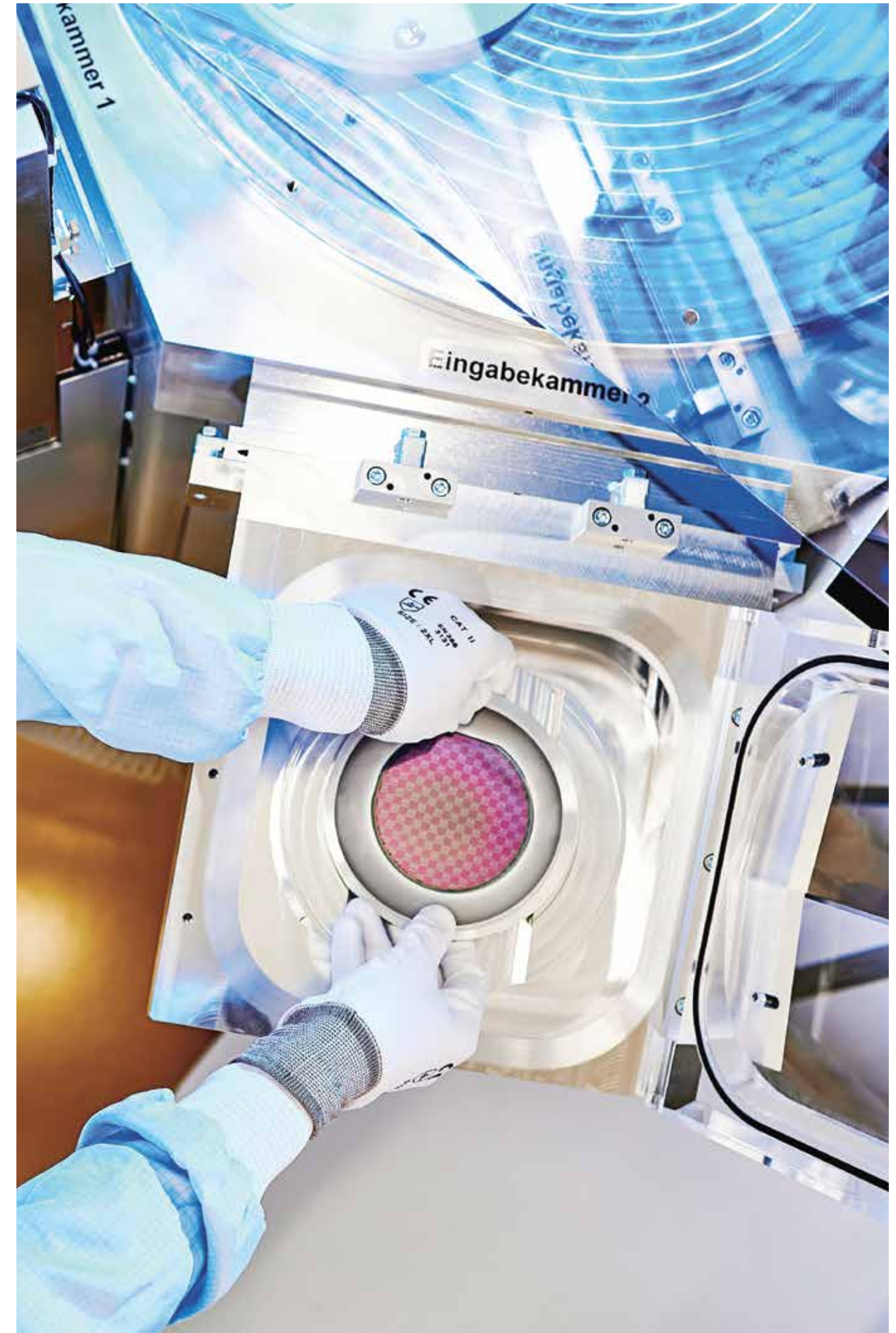
Phone +49.30.6392-2620
wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de

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
Web 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
08/2023

Editors | Redaktion

Petra Immerz , Gisela Gurr, Alexandra Pubantz

Layout | Gestaltung

telegrafik berlin

Printing | Druck

ARNOLD group – arnoldgroup.de

This annual report was produced eco-friendly & climate-neutral.

Dieser Jahresbericht wurde umweltfreundlich & klimaneutral produziert.

Images & Graphics | Fotos & Grafiken

Cover: from top left to bottom right |

von li. oben nach re. unten: M. Baumbach (1 + 5), P. Immerz (2), B. Schurian (3 + 4)

P. Immerz: pp. 2, 16, 21, 29, 41, 48, 49, 50, 58, 63, 98, 115, 122, 124, 126, 128, 129

C. Ruß: p. 6

M. Baumbach: pp. 7, 8, 14, 18, 24, 27, 30, 37, 43, 45, 51, 52, 74, 86, 106, 112, 114, 116, 130, 135, 137

ANH Berlin: pp. 22, 23

FMD: pp. 26, 28

M. Trovato: p. 32

HU Berlin: pp. 33, 80, 81

DLR: p. 35 (top)

N. Goossen-Schmidt: pp. 35 (bottom), 78

G. Gurr: p. 36

R. Jäger: p. 38

B. Schurian: pp. 39, 40, 54, 62, 68, 72

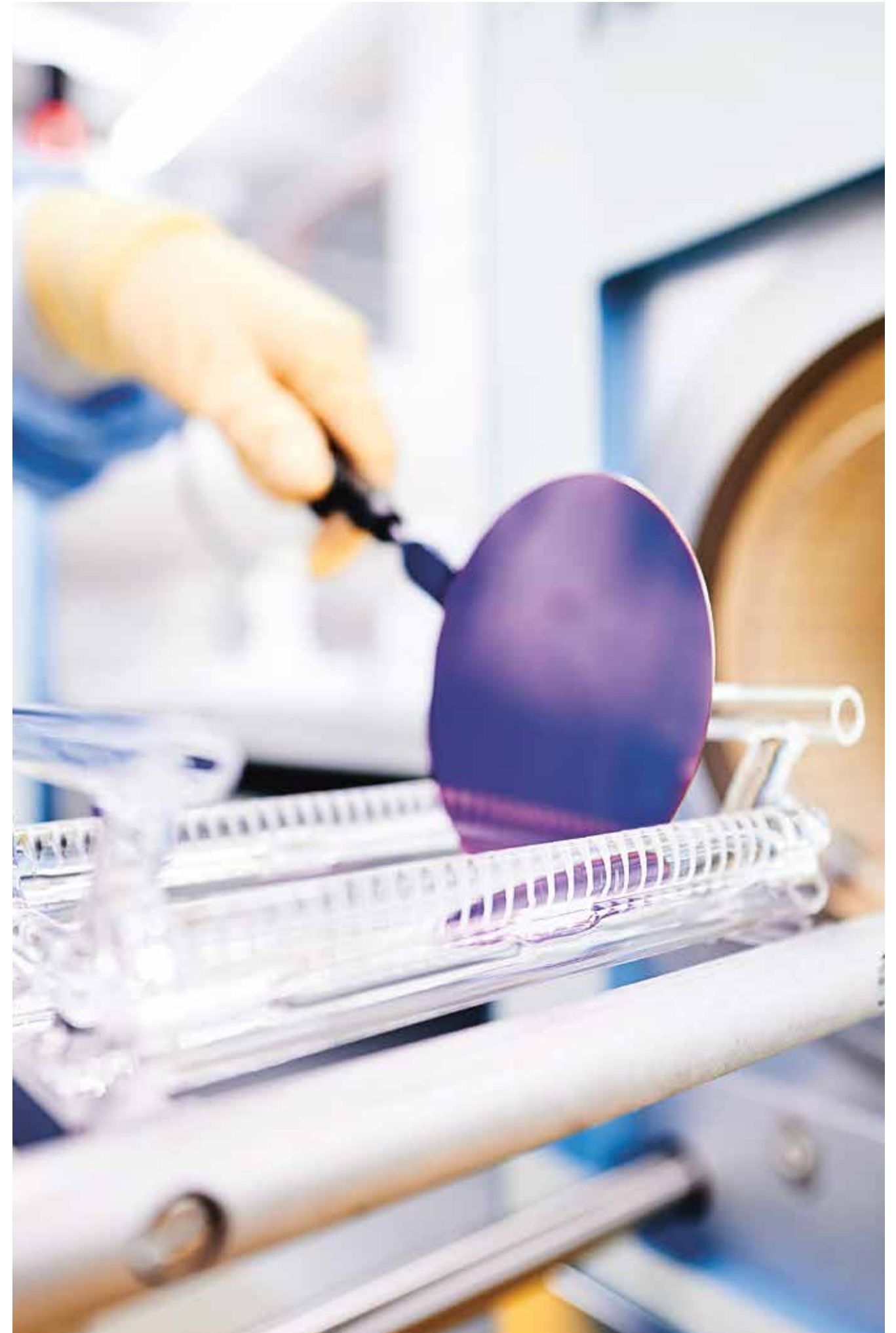
T. Rosenthal: p. 47

NASA: p. 76

N. Vlach: pp. 42, 94, 127

J. Pahl: p. 125

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



Ferdinand-Braun-Institut gGmbH
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin, Germany
www.fbh-berlin.de