

ANNUAL
REPORT
JAHRES
BERICHT



2021 | 2022

**ANNUAL
REPORT**
JAHRES
BERICHT

Editorial

Vorwort



„**Very good, at times even excellent**“, this is how the international group of experts assessed the status and achievements of the Ferdinand-Braun-Institut in the Leibniz Association's regular evaluation process. The current evaluation report emphasizes not only the high quality of our research, but also the "excellent results in technology transfer" – evidenced by an "impressively high number of patents", spin-offs, the close cooperation with industry and, last but not least, the exceptionally high share of industrial and public third-party funding. The state-of-the-art infrastructure operated in the two cleanrooms was also highlighted. Looking to the future, the reviewers also expressed their appreciation, characterizing the additional involvement in quantum technology as a "very good strategic decision."

In 2022, we are looking back on 30 years of internationally recognized cutting-edge research and technology transfer in high-frequency electronics, photonics, and quantum physics – and are well prepared for future requirements. Despite all adversities caused by the COVID-19 pandemic, 2021 was again – not only economically – a very successful year for us. We put our second cleanroom into operation, among others, and can now offer processes and services that are unique in many cases. In parallel, we are expanding our activities in the field of developments for space applications into an "Aerospace Competence Center". Thus, we are positioning ourselves as a partner for the national and European space industry and research.

Our collaborations in major alliances are developing excellently: Research Fab Microelectronics Germany is in regular operation after the set-up phase – joint initiatives are targeting, for example, trustworthy electronics, 6G, and Green-ICT. In its more than seven years of collaboration, the "Advanced UV for Life" consortium has advanced the technical development, availability and use of UV LEDs on a broad scale. This has been so successful that the approximately 50 partners are continuing their cooperation in an association of the same name. Under the catch phrase "Leibniz@Lausitz", we are continuing to contribute to advancing structural change in the Brandenburg Coal Region.

„**Sehr gut und vielfach hervorragend**“, so bewertete die internationale Gutachtergruppe in dem turnusgemäßen Evaluierungsverfahren der Leibniz-Gemeinschaft den Status und die Arbeitsergebnisse des Ferdinand-Braun-Instituts. Der aktuelle Evaluierungsbericht betont nicht nur unsere exzellente Forschung, sondern auch die „ausgezeichneten Ergebnisse beim Technologietransfer“ – belegt durch eine „beeindruckend 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 beim Blick in die Zukunft fanden die Gutachter lobende Worte und bezeichneten den zusätzlichen Einstieg in die Quantentechnologie als „sehr gute strategische Entscheidung.“

2022 blicken wir auf nunmehr 30 Jahre international anerkannte Spitzenforschung und Technologietransfer in Hochfrequenzelektronik, Photonik und Quantenphysik zurück – und sind bestens auf künftige Anforderungen vorbereitet. Trotz aller Widrigkeiten durch die Corona-Pandemie war 2021 erneut – nicht nur finanziell – ein sehr erfolgreiches Jahr für uns. Wir haben unter anderem unseren zweiten Reinraum in Betrieb genommen und können nun teils einzigartige Prozesse und Dienstleistungen anbieten. Parallel bauen wir unsere Aktivitäten im Bereich der Entwicklungen für Weltraumwendungen zu einem „Aerospace Competence Center“ aus. Damit positionieren wir uns als Partner für die nationale und europäische Raumfahrtindustrie und -forschung.

Unsere Kooperationen in großen Verbänden entwickeln sich ausgezeichnet: Die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland läuft nach der Aufbauphase im Regelbetrieb – und bündelt Initiativen wie etwa zu vertrauenswürdiger Elektronik, 6G und Green-ICT. Das Konsortium „Advanced UV for Life“ hat in seinen mehr als sieben Jahren der Zusammenarbeit die technische Entwicklung, die Verfügbarkeit und den Ein-

The mid-term goal is to establish an FBH branch office at the BTU in Cottbus.

Our research activities, which are carried out in close cooperation with partners from science and industry, yield excellent results. These include the first fully digital transmitter chain that successfully transmits broadband signals with maximum efficiency and linearity. We have also significantly optimized the efficiency of our far-UVC LEDs and integrated them into a swiveling irradiation system designed and realized by our Prototype Engineering Lab. This system is now being tested for the first time directly on humans at Charité. Setting up our new research area Integrated Quantum Technology is nearly completed. Only recently, we have successfully demonstrated an autonomously operating frequency reference based on rubidium. It is the prerequisite for developing compact optical atomic clocks to be used in space. Further information on our research activities and the strategic alliances can be found in this annual report.

We are currently setting the course for the future in various areas. This also applies to our institute management. Dr. Karin-Irene Eiermann will start her position as Administrative Director in September 2022 and the appointment of the Scientific Director is well on track.

Our success is based on the cooperation of many dedicated colleagues. Without their comprehensive know-how and tremendous enthusiasm, we would not be able to realize so many great ideas. My thanks also go to our funding institutions at the State of Berlin and the Federal Government, whose financial support and great personal commitment make it possible for us to conduct top-level international research. Last but not least, I would like to thank our partners and customers from science and industry for their many years of trusting cooperation. Keep up the good work!

We have summarized the results and events of the past year in this report. I wish you an inspiring read,

Günther Tränkle

satz von UV-LEDs in breitem Maße vorangebracht. Dies war so erfolgreich, dass die etwa 50 Partner ihre Kooperation im gleichnamigen Verein fortführen. Unter dem Schlagwort „Leibniz@Lausitz“ beteiligen wir uns auch weiter daran, den Strukturwandel im brandenburgischen Kohlrevier voranzubringen. Mittelfristiges Ziel ist es, eine Außenstelle des FBH an der BTU in Cottbus zu etablieren.

Unsere Forschungsarbeiten, die in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie entstehen, liefern exzellente Ergebnisse. So haben wir die erste voll-digitale Transmitterkette realisiert, die breitbandige Signale mit höchster Effizienz und Linearität erfolgreich überträgt. Die Effizienz unserer ultrakurzwelligen UVC-LEDs haben wir ebenfalls deutlich optimiert und in ein schwenkbares Bestrahlungssystem integriert, das unser Entwicklungszentrum konzipiert und realisiert hat. Dieses System wird nun an der Charité erstmals direkt am Menschen getestet. Der Aufbau unseres neuen Forschungsbereichs Integrierte Quantentechnologie ist weitgehend abgeschlossen. Erst kürzlich konnten wir erfolgreich eine autonom arbeitende Frequenzreferenz auf der Basis von Rubidium demonstrieren. Sie ist die Voraussetzung, um kompakte optische Atomuhren zu entwickeln, die im Weltraum eingesetzt werden sollen. Weiteres zu unseren Forschungsaktivitäten und den strategischen Verbänden finden Sie in diesem Jahresbericht.

Gegenwärtig stellen wir an verschiedenen Stellen die Weichen für die Zukunft. Das gilt auch für unsere Institutsleitung. Frau Dr. Karin-Irene Eiermann wird ab September 2022 als administrative Geschäftsführerin beginnen und die Besetzung der wissenschaftlichen Geschäftsführung ist auf einem guten Weg.

Unser Erfolg ist das Ergebnis der Zusammenarbeit von vielen engagierten Kolleginnen und Kollegen. Ohne deren umfassendes Know-how und ihren unermüdlichen Einsatz könnten wir viele tolle Ideen nicht realisieren. Mein Dank gilt auch unseren Zuwendungsgebern beim Land Berlin und dem Bund, die uns mit ihrer finanziellen Unterstützung und viel persönlichem Engagement Forschung auf internationalem Spitzenniveau ermöglichen. Nicht zuletzt danke ich unseren Partnern und Kunden aus Wissenschaft und Industrie für die langjährige, vertrauensvolle Zusammenarbeit. Weiter so!

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

22 Highlights Schlaglichter

60 Photonics Photonik

- 62 Improved laser facet stability by ultra-high vacuum cleaving
- 64 Wavelength-stabilized diode lasers with epitaxially-stacked multiple active regions and tunnel junctions for LiDAR applications
- 66 Effective temperature method to predict stress in optical GaAs devices
- 68 Extreme vertical asymmetry for wide-ranging improvements in power and efficiency in broad area lasers
- 70 Scaling to support high-energy class lasers: higher power and high duty cycle in 780 nm diode laser pulsed pump modules
- 72 Coherent beam combining setup with diode laser and two individual tapered amplifiers at 808 nm
- 74 Shifted excitation Raman difference spectroscopy for soil inspection – out of the lab into the field
- 76 785 nm DBR tapered diode lasers with high output power for large spot-size Raman measurements
- 78 Towards GaN-based laser diodes with long lifetimes for quantum technology applications
- 80 Spectrally pure far-UVC emission from LEDs using dielectric band pass filters for skin-tolerant UV antiseptis

82 Integrated Quantum Technology Integrierte Quantentechnologie

- 84 Comprehensive investigation of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ as a material for miniaturized optical isolators
- 86 DBR laser chips in the red wavelength range for strontium-based optical atomic clocks
- 88 Micro-integrated, crossed beam optical dipole trap for cold-atom-based quantum sensors

- 90 High-sensitivity magnetometry with ensembles of atomic defects in diamond
- 92 Direct nanofabrication of on-chip nano-optical components

94 III-V Electronics III/V-Elektronik

- 96 Digitizing 6G – sub-THz switch-mode circuits for highly efficient wireless communication systems
- 98 D-band chipset for 6G wireless communications
- 100 Highly linear radar power detectors for medical sensing applications
- 102 Accurate calibration of on-wafer measurements up to 220 GHz
- 104 Low-loss flip-chip process for heterointegration of InP chips with BiCMOS
- 106 Reducing contact and gate resistances – to optimize GaN mm-wave transistors
- 108 $\text{SnO}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction field-effect transistors for high voltage switching applications
- 110 AlN-based platform for high-voltage switching and for mm-wave amplification

112 III-V Technology III/V-Technologie

- 114 Dark spots around threading dislocations in GaN and AlGaN crystals – impact on internal quantum efficiency
- 116 Development of III-V based optically pumped VCSELs for ultrashort pulse lasers
- 118 Preliminary studies for hetero-integration of InP on silicon using In bumps
- 120 Galvanic metal deposition – bridging the range from micrometer to nanometer scale
- 122 Reaching full production traceability – introducing digital processing control into an R&D environment

124 Annex Anhang

- 126 Facts & Figures
Zahlen & Fakten
- 128 Personnel & Awards
Personalien & Auszeichnungen
- 132 Events
Veranstaltungen
- 140 Structure of the Institute
Institutsstruktur
- 144 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 visible 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 sichtbaren 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

- technology transfer & marketing
- 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- und Produktionstechnik, ...

Integrierte Quantentechnologie

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

III/V-Elektronik

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

III/V-Technologie

- Epitaxie (MOVPE) von GaAs- & GaN-basierten Schichtstrukturen für Bauelemente
- (Al)GaN-HVPE für Volumenkristalle
- In-situ Kontrolltechniken bei MOVPE & HVPE
- Komplette Prozesslinie 2" – 4" für GaAs-, InP-, SiC- & GaN-Bauelemente inklusive Lasermikrostrukturierung
- InP-HBT-Technologie für Millimeterwellen- & THz-Anwendungen, heterointegrierter SiGe-BiCMOS-/InP-HBT-Foundryprozess mit dem IHP
- Aufbau- & Verbindungstechnik

Wissenschaftsmanagement

- Technologietransfer & Marketing
- 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. For example, the team has been coordinating *Advanced UV for Life* for many years. Until the end of 2021, the Twenty20 consortium with almost 50 partners researched and developed UV-LED technology along the entire value chain – from crystal to application in devices, such as for skin analysis. In the future, this work will be continued and further expanded through an association of the same name.

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. Dazu zählt beispielsweise seit vielen Jahren *Advanced UV for Life*. Das Zwanzig20-Konsortium mit knapp 50 Partnern erforschte und entwickelte bis Ende 2021 die UV-LED-Technologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette – vom Kristall bis zur Anwendung, beispielsweise für Geräte zur Hautanalyse. Diese Arbeiten werden künftig im gleichnamigen Verein fortgeführt und weiter ausgebaut.

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 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 haben es uns 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.

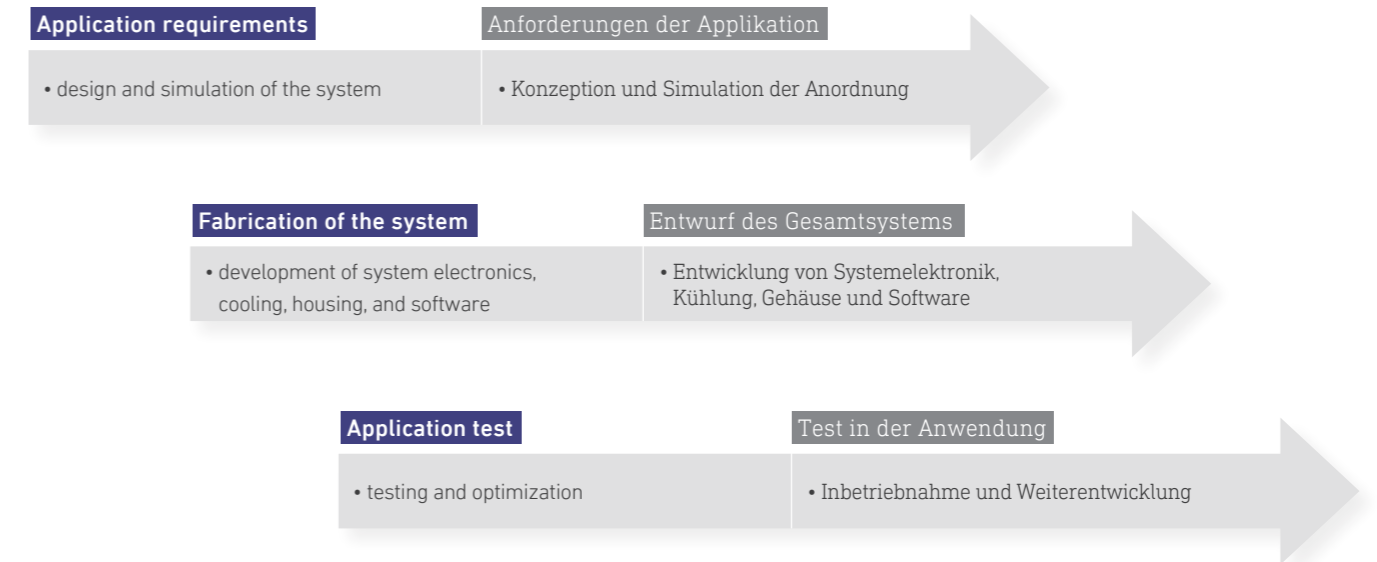


Hand in hand – making research usable

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 the development. The devices should also be compact and easy to operate, even by personnel without specialized knowledge of the respective system. Thus, prototype development always has the application and intuitive

operation in mind. As an application example, you can find a mobile system for Raman spectroscopy on p.52.

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. When integrating laser modules, for example, the arrangement



➡ Programmable multi-source laser driver (PMSD) with ten individually programmable current sources (DC) in a single device developed for experimental tests of FBH laser modules.

Programmierbarer Multi-Source-Lasertreiber (PMSD) mit zehn individuell programmierbaren Stromquellen (DC) in einem einzigen Gerät, das für experimentelle Tests von FBH-Lasermodulen entwickelt wurde.

➡ LED-based irradiation system with four individually controllable wavelengths. The modular segments can be mechanically interconnected wire-free into 1-D or 2-D arrays for a flexible illumination area.

LED-basiertes Bestrahlungssystem mit vier einzeln ansteuerbaren Wellenlängen. Die modularen Segmente können mechanisch und drahtlos zu 1-D- oder 2-D-Arrays zusammenschaltet werden, um einzelne Bereiche flexibel auszuleuchten.



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 high-precision arrangement of all (opto)electronic and mechanical components, operated with a commercially available plug-in or desktop power supply.

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

Customized solutions for special applications

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 multi-wavelength 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.

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 hochintegrierten 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. Als Anwendungsbeispiel finden Sie ein mobil einsetzbares System für die Raman-Spektroskopie auf S. 54.

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-Lasertreiber-systemen 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.



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 dedicated to 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.



➊ New impulses for the network's activities and for vocational education and training in micro- and nanotechnology are provided by the BM = x³ project as part of the BMBF's InnoVET competition.
 Neue Impulse für die Arbeit des Netzwerks und für die berufliche Bildung in Mikro- und Nanotechnologie gibt das Projekt BM = x³ im Rahmen des BMBF-Wettbewerbs InnoVET.

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 supraregional 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 put together based on a modular system.

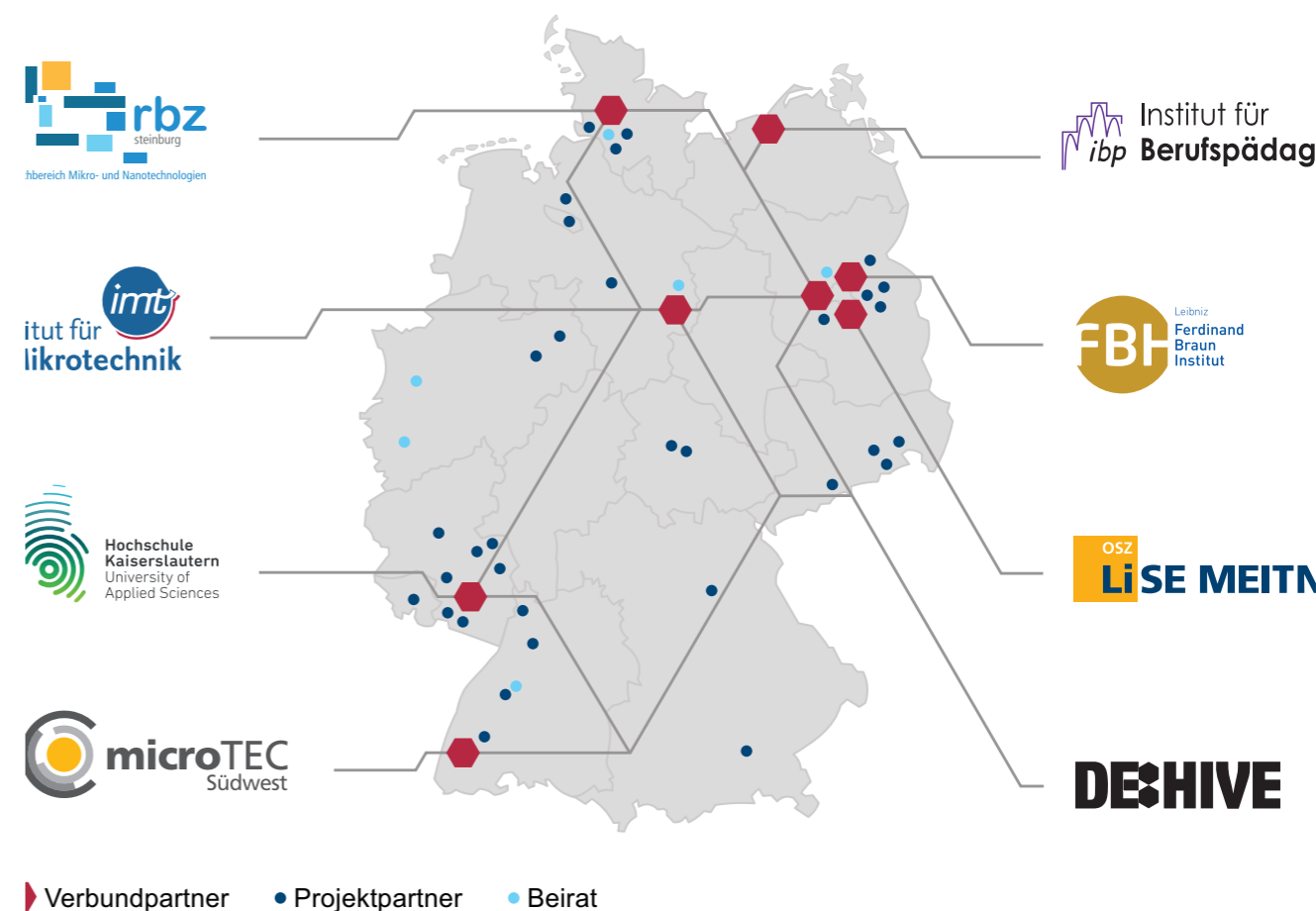
www.bmx3.net

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.

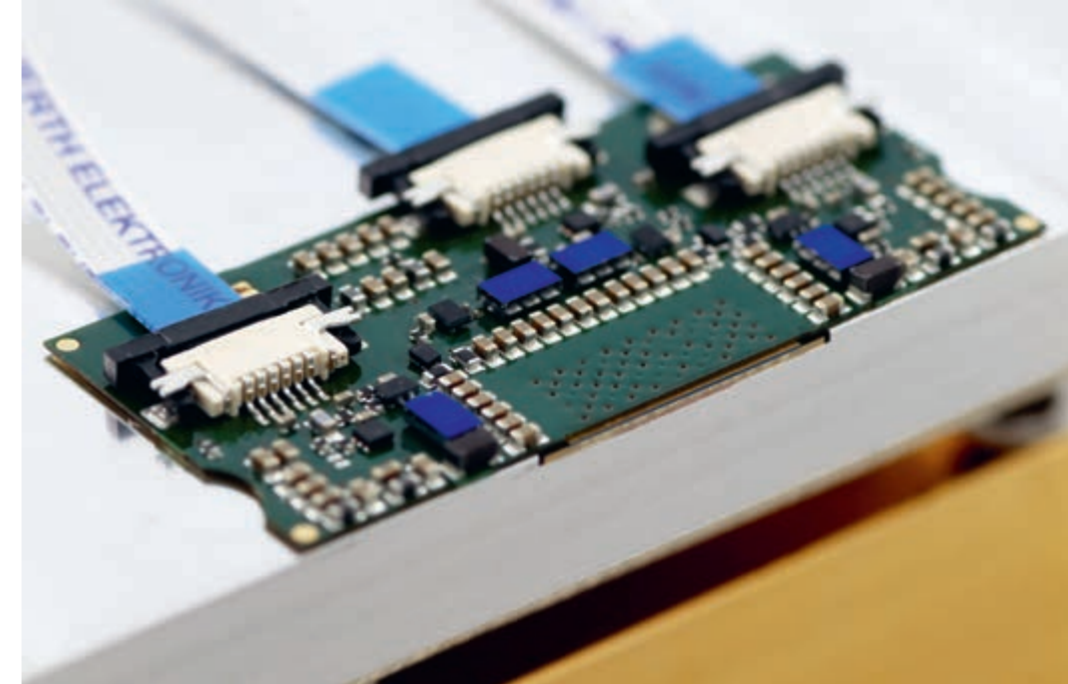
Passgenaue Aus- und Weiterbildung in Schlüsseltechnologien
 Unter Leitung von ANH Berlin konzipieren acht Verbundpartner die Microtec Academy – eine überregionale Berufsbildungsakademie, die speziell auf den stark diversifizierten Hochtechnologiebereich zugeschnitten ist. Unternehmen werden kompetent 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.

www.bmx3.net





Highlights Schlaglichter



- Wavelength-stabilized pulsed laser source for line scanners with 2 kW output power for LiDAR applications. Wellenlängenstabilisierte Puls laserquelle für Linienscanner mit 2 kW Ausgangsleistung für LiDAR-Anwendungen.

Next generation of LiDAR chips – higher output power at the same current

By using LiDAR – short for Light Detection and Ranging – distances and speeds can be measured optically with utmost precision. Even three-dimensional objects are identified by the echoes of the light pulses emitted by the laser. This makes LiDAR just as attractive for autonomous driving on the roads as it is for precision agriculture, for example, to enable tractors to be navigated precisely and thus used efficiently. Three-dimensional maps utilized for geography, geology or archeology, for example, are also created in this way.

For several years, we have been developing suitable laser chips and compact laser modules for this purpose, which have been successfully tested, among others, in a wide-angle LiDAR system for 3D object recognition. In parallel, we are already working on the next generation of LiDAR chips and have developed a new pulse laser source for line scanners. Compared to previ-

ous lasers, it offers two and a half times more power at the same current, which makes this source ideally suited for longer ranges.

This latest generation line scanner laser source delivers a peak pulse power of 2 kW for 8 ns long pulses at a pulse current of 1.15 kA. It is based on wavelength-stabilized multidiode lasers emitting at 905 nm with multiple tunnel diodes and active layers in a common waveguide. Due to the on-chip DBR, the emission wavelength changes with temperature by only 0.07 nm/K, as before, and the spectral width of the laser emission is only 0.25 nm. Further details on multidiode lasers can be found on p.64.

Nächste Generation von LiDAR-Chips – mehr Leistung bei gleichem Strom



LiDAR sensors will also be used in precision agriculture in the future.

Auch in der Präzisionslandwirtschaft werden LiDAR-Sensoren künftig eingesetzt.

Mithilfe von LiDAR – kurz für Light Detection and Ranging – lassen sich Abstände und Geschwindigkeiten hochpräzise optisch messen. Auch dreidimensionale Objekte werden durch die Lichtpulse erkannt, die der Laser aussendet und die dann detektiert werden. Das macht LiDAR für das autonome Fahren im Straßenverkehr ebenso attraktiv wie für die Präzisionslandwirtschaft, um etwa Traktoren präzise navigieren und damit effizient einsetzen zu können. Auch dreidimensionale Landkarten, die beispielsweise für Geographie, Geologie oder Archäologie genutzt werden, entstehen auf diese Weise.

Seit mehreren Jahren entwickeln wir dafür geeignete Laserchips und kompakte Lasermodule, die unter anderem erfolgreich in einem Weitwinkel-LiDAR-System zur 3D-Objekterkennung getestet wurden. Parallel arbeiten wir bereits an der nächsten Generation von LiDAR-Chips und haben eine neue Puls laserquelle für Linienscanner entwickelt. Verglichen mit

den bisherigen Lasern, bietet sie zweieinhalbmal mehr Leistung bei gleichem Strom. Sie eignet sich damit ideal für größere Reichweiten.

Die Laserquelle für Linienscanner der neuesten Generation liefert eine Pulsspitzenleistung von 2kW für 8 ns lange Impulse bei einem Pulsstrom von 1,15 kA. Sie basiert auf wellenlängenstabilisierten Multidiodenlasern bei 905 nm mit mehreren Tunnel dioden und aktiven Schichten in einem gemeinsamen Wellenleiter. Durch den On-Chip-DBR ändert sich die Emissionswellenlänge wie bisher mit der Temperatur um lediglich 0,07 nm/K, die spektrale Breite der Laseremission beträgt nur 0,25 nm. Weitere Details zu Multidiodenlasern gibt es auf S. 64.

Improving the quality assurance of laser diodes using artificial intelligence

Quality assurance in the photonics sector has hardly been automated to date. High-power laser diodes are usually inspected visually, image by image through highly qualified personnel. In the LaserSKI project headed by the company dida Datenschmiede, we are working on a more objective, efficient and reliable method to ensure the quality of lasers and to minimize the error rate. For this purpose, we are developing with dida and further partners an AI-based method that will digitize the infrastructure for inspecting laser diodes and automate the

previous visual processes. dida has already received several awards for its AI solutions – most recently from UNESCO's International Research Center for Artificial Intelligence.

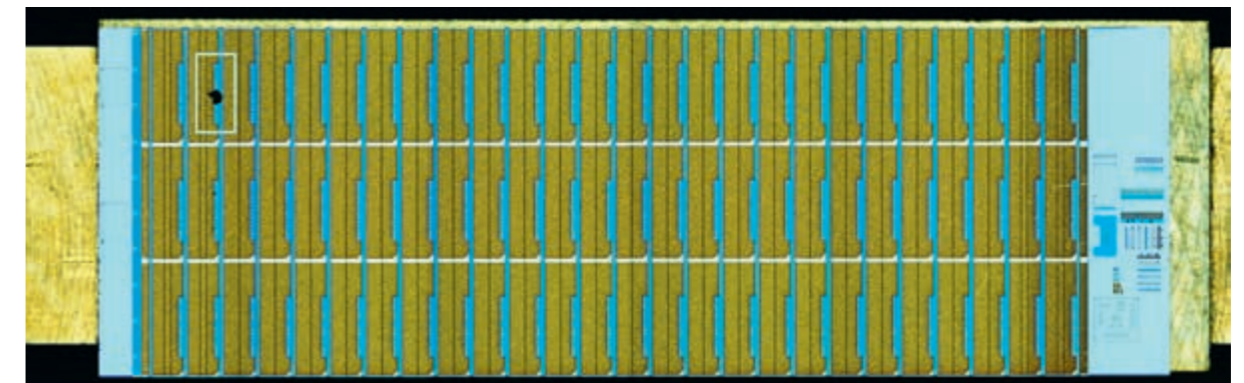
Along the way, we have since classified defect types and developed an AI-based algorithm in the project that we 'train' with corresponding images to reliably detect defects. This algorithm is currently being tested at the photonics partners, further optimized and will then be implemented.

Bessere Qualitätssicherung von Laserdioden durch Künstliche Intelligenz

Die Qualitätssicherung in der Photonik-Branche ist bislang kaum automatisiert. Hochleistungs-Laserdioden werden meist visuell und anhand einzelner Bilder durch hochqualifizierte Mitarbeiter inspiziert. Im Projekt LaserSKI arbeiten wir an einer objektiveren, effizienten und zuverlässigen Methode, um die Qualität von Lasern zu sichern und die Fehlerquote zu minimieren. Dazu entwickeln wir unter Leitung des Unternehmens dida Datenschmiede und gemeinsam mit weiteren Partnern ein KI-basiertes Verfahren, mit dem wir die Infrastruktur zur Inspektion von Laserdioden digitalisieren und die bisherigen visuellen Prozesse automatisieren. dida wurde

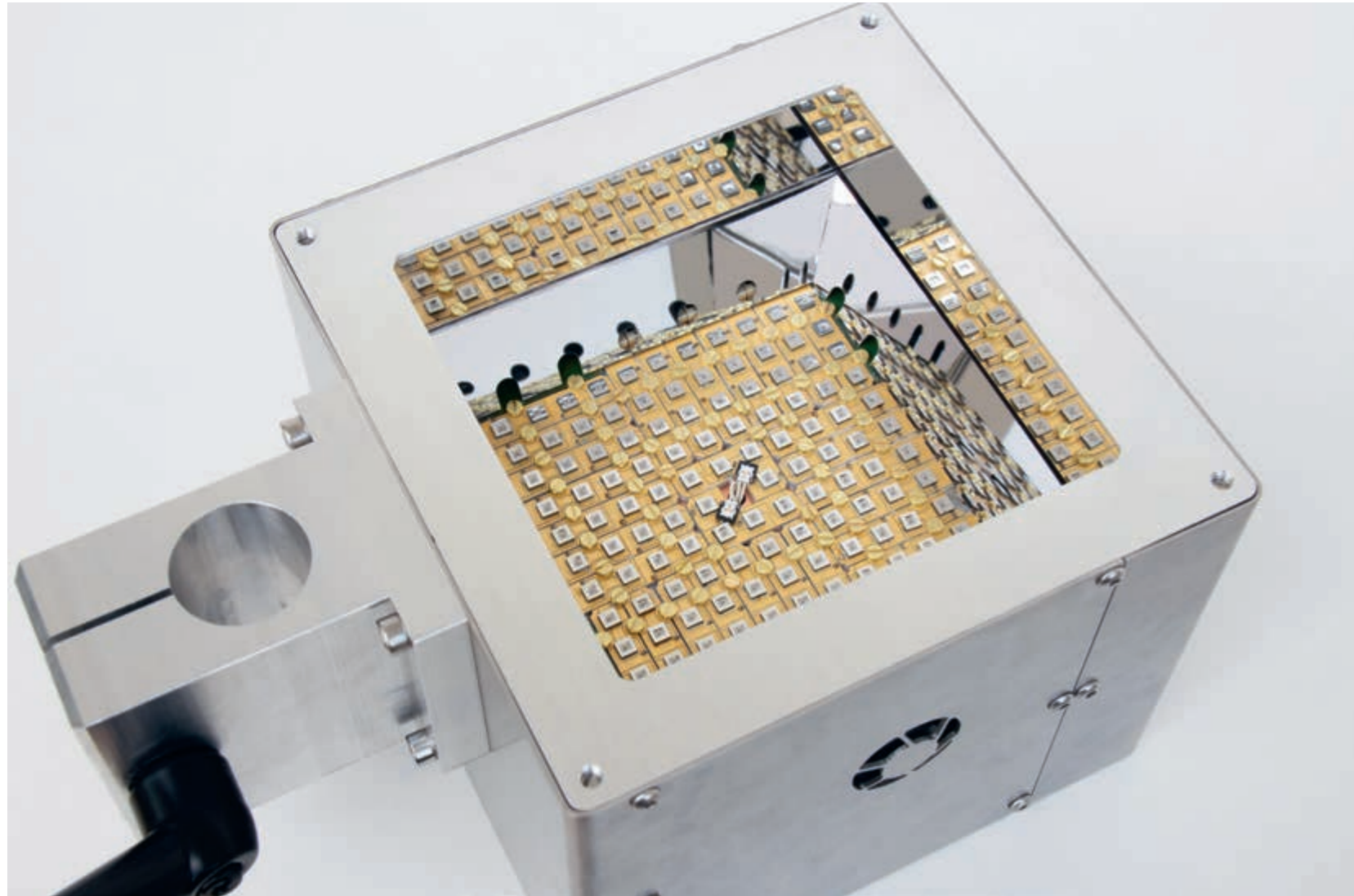
bereits mehrfach für seine KI-Lösungen ausgezeichnet – zuletzt vom Internationalen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz der UNESCO.

Auf dem Wege dahin, haben wir bereits Fehlerarten klassifiziert und im Projekt einen KI-basierten Algorithmus entwickelt, den wir mit entsprechenden Bildern „trainieren“, um Fehler zuverlässig zu erkennen. Dieser Algorithmus wird aktuell bei den Photonik-Partnern getestet, weiter optimiert und soll anschließend implementiert werden.



Defects on the laser facet (in the top left of the image) are detected automatically by the software, as are markers and the IDs of the laser diodes.

Defekte auf der Laserfacette (im Bild links oben) erkennt die Software ebenso automatisiert wie Marker und die IDs der Laserdioden.



➤ Irradiation unit comprising 120 UV LEDs – not yet with the optimized housings.
Bestrahlungseinheit mit 120 UV-LEDs – noch ohne die optimierten Gehäuse.

»» *The ability of far-UVC LEDs to inactivate pathogens without causing resistances to develop is highly interesting for the medical field, since their radiation does not reach the living layers of the skin.*



➤ UV LED irradiation system with which Charité is currently performing medical tests on human skin.
UV-LED-Bestrahlungssystem, mit dem die Charité derzeit medizinische Tests an menschlicher Haut durchführt.

On a good track to application – extremely short-wavelength UVC LEDs with higher efficiency

Last year, we were able to significantly improve the efficiency of light-emitting diodes (LEDs) that emit spectrally purely in the far UVC range. As a result, these AlGaIn-based LEDs with emission below 240nm are also becoming increasingly interesting for commercial applications. Emissions at such short wavelengths can be used to monitor gas concentrations, measure nitrate in water, and even render microorganisms harmless. The ability of far-UVC LEDs to inactivate pathogens without causing resistances to develop is highly interesting for the medical field, since their radiation does not reach the living layers of the skin.

Studies by our partner, Greifswald University Medicine, have already shown that microorganisms and multi-resistant pathogens such as MRSA can be efficiently killed with this method. In parallel, the Charité, Universitätsmedizin Berlin, has determined which irradiation dose does not cause any lasting damage to the skin. The investigations have since been extended to SARS-CoV-2 and other respiratory viruses, which are to be rendered harmless on surfaces and skin by means of UVC light.

Process and packaging optimizations

As part of the Joint Lab GaN Optoelectronics, we have been cooperating with TU Berlin to develop AlGaIn-based far-UVC LEDs emitting at 233nm with unprecedented performance. For this purpose, several steps along the LED manufacturing chain were optimized. Among others, we were able to reduce the dislocation density with epitaxially laterally overgrown AlN/sapphire substrates and to develop low-resistance vanadium-based n-metal contacts. The chip assembly with a reflector frame and a UV-transparent lens also ensures strong focusing of the emission – with a beam intensity of 3 mW/sr at 20mA. An estimated lifetime of over 1,500 hours is achieved after 100 hours of burn-in, which is usually sufficient for sensing applications.

FBH involved in DIN standard for water disinfection

Radiation from UVC LEDs has been confirmed to disinfect drinking water. However, for regulatory reasons, only mercury-based UV irradiation systems may currently be used in municipal drinking water supplies in Germany. The DINoLED project aims to change this with a DIN standard draft that is intended to regulate water disinfection using UV LEDs in Germany. Our partners are the Water Technology Center, the Physikalisch-Technische Bundesanstalt and the companies OSRAM OS, Opsytec Dr. Gröbel, and Xylem.

Auf gutem Weg in die Anwendung – extrem kurzwellige UVC-LEDs mit höherer Effizienz

Im vergangenen Jahr konnten wir die Effizienz von Leuchtdioden (LEDs), die spektral rein im fernen UVC-Bereich abstrahlen, deutlich verbessern. Damit werden diese AlGaIn-basierten LEDs mit einer Emission unter 240 nm auch für kommerzielle Anwendungen immer interessanter. Mit Strahlung derart kurzer Wellenlänge lassen sich Gaskonzentrationen überwachen, Nitrat im Wasser messen und sogar Mikroorganismen unschädlich machen. Die Fähigkeit der Fern-UVC-LEDs, Krankheitserreger zu inaktivieren, ohne dass sich Resistenzen bilden, ist für den medizinischen Bereich hochinteressant, erreicht doch ihre Strahlung nicht die lebenden Schichten der Haut.

Untersuchungen unseres Partners Universitätsmedizin Greifswald haben bereits gezeigt, dass sich Mikroorganismen und multiresistente Erreger wie etwa MRSA damit effizient abtöten lassen. Die Charité, Universitätsmedizin Berlin wiederum hat parallel ermittelt, welche Bestrahlungsdosis die Haut nicht nachhaltig schädigt. Die Untersuchungen wurden inzwischen auf SARS-CoV-2 und weitere Atemwegsviren ausgedehnt, die auf Oberflächen und Haut mittels UVC-Licht unschädlich gemacht werden sollen.

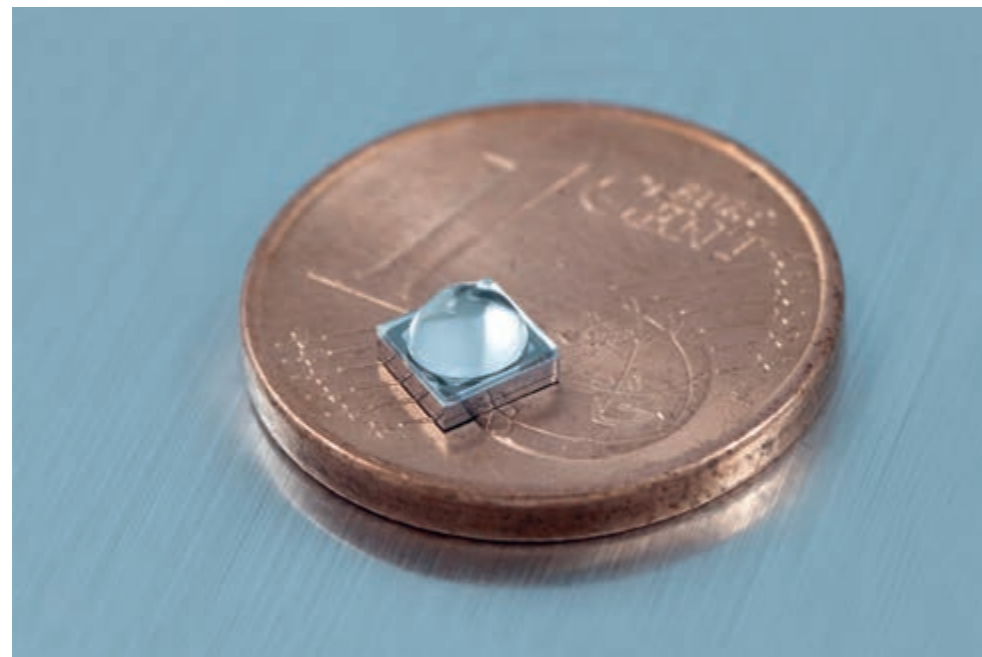
Optimierungen im Prozess und bei Gehäusen

Im Rahmen des Joint Lab GaN Optoelectronics haben wir gemeinsam mit der TU Berlin AlGaIn-basierte Fern-UVC-LEDs

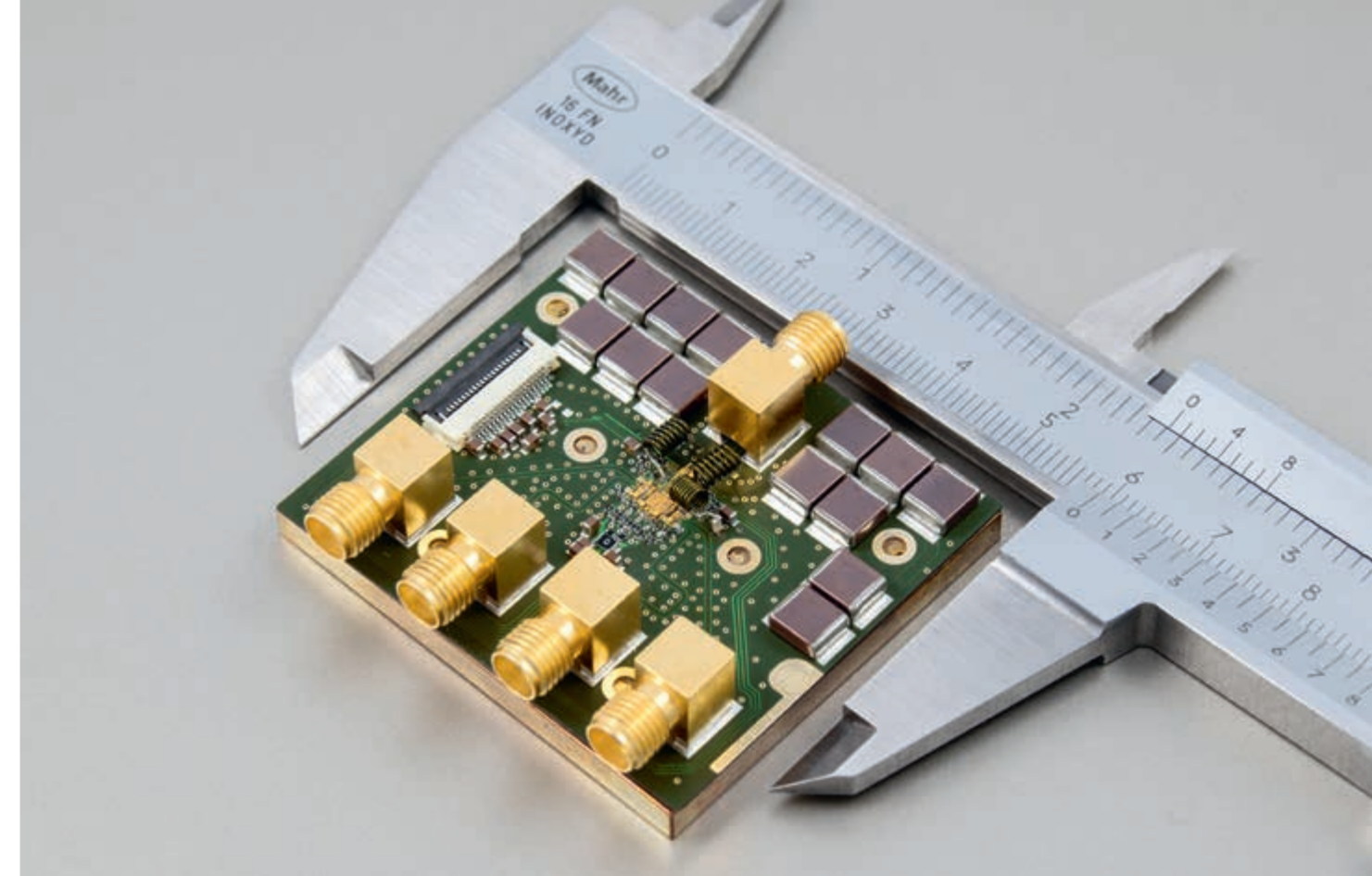
mit einer Emission bei 233 nm und einer bisher unerreichten Emissionsleistung entwickelt. Dazu wurden mehrere Schritte der LED-Fertigungskette optimiert. Unter anderem konnten wir die Versetzungsdichte mit epitaktisch lateral überwachsenen AlN/Saphir-Substraten reduzieren und haben n-Metall-Kontakte auf Vanadiumbasis mit geringem Widerstand entwickelt. Die Chipmontage mit einem Reflektorrahmen und einer UV-transparenten Linse sorgt zudem für eine starke Bündelung der Emission – mit einer Strahlstärke von 3 mW/sr bei 20 mA. Eine geschätzte Lebensdauer von über 1.500 Stunden wird nach einem Burn-in von 100 Stunden erreicht. Für Anwendungen in der Sensorik ist dies im Allgemeinen ausreichend.

FBH an DIN-Norm für Wasserdeseinfektion beteiligt

Die Strahlung von UVC-LEDs desinfiziert nachweislich Trinkwasser. Aus regulatorischen Gründen dürfen derzeit jedoch nur Quecksilber-basierte UV-Bestrahlungssysteme bei der kommunalen Trinkwasserversorgung in Deutschland eingesetzt werden. Das will das Förderprojekt DINoLED mit einem DIN-Normentwurf ändern, mit dem die Wasserdeseinfektion mittels UV-LEDs in Deutschland geregelt werden soll. Unsere Partner sind das Technologiezentrum Wasser, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt sowie die Firmen ams OSRAM OS, Opsytec Dr. Gröbel und Xylem.



UVC LED chip in silicon-based package with plano-convex quartz lens that optimally focuses the radiation. UVC-LED-Chip in Silizium-basiertem Package mit plano-konvexer Quarzlinse, die die Strahlung optimal bündelt.



Digital power amplifier for 5G mobile communications. Digitaler Leistungsverstärker für die mobile 5G-Kommunikation.

Technologically sovereign – on future topics such as 6G and Green ICT

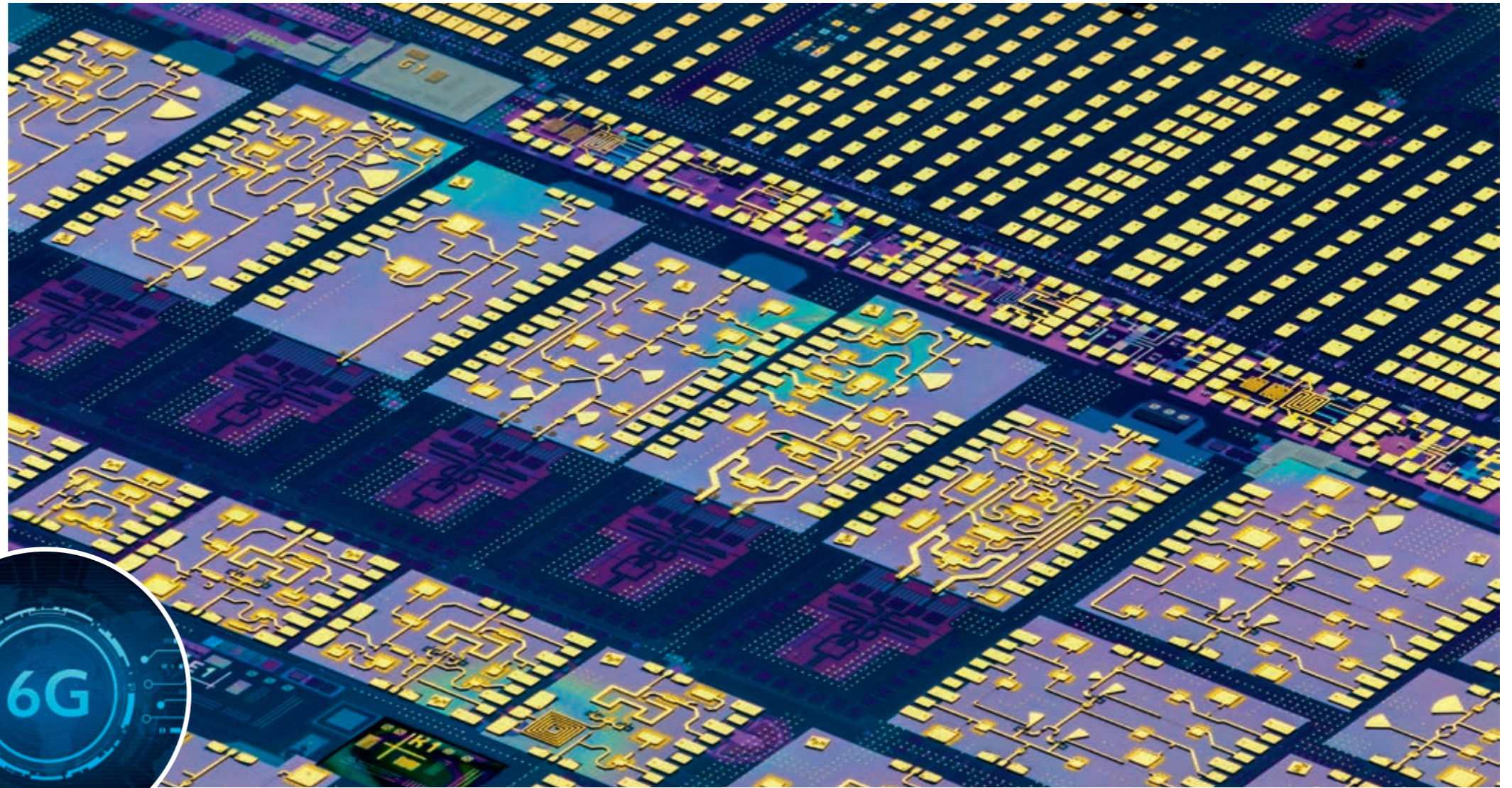
When international supply chains no longer run smoothly and components are missing during production – the results of such dependencies are something we have seen clearly in the Corona pandemic in industries such as automotive manufacturing. However, it was recognized earlier how important technological sovereignty is in Germany and Europe. Countermeasures were taken, among others, with the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) launched in 2017. The alliance of 13 research institutes, among them FBH, received 350 million Euros in funding from the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) until 2021, which was invested in high-tech process equipment. In the FMD, the partners pool their technological resources and know-how. This alliance acts as a one-stop shop for research services and developments that companies need in the field of microelectronics – beyond the scope of individual institutes. In other key areas, such as energy, security or digitization, the objective is to remain fit for the future with know-how and state-of-the-art technologies and thus to secure prosperity and jobs in our own country and in Europe. The article on p. 42 provides insights into further FMD activities.

Digitalization, energy efficiency and future communication technologies

In the age of digitization, sovereignty in communications networks, especially wireless ones, is at the top of the agenda. To ensure that Germany is well equipped for this task and the future 6G communications standard, the BMBF is funding four research hubs across Germany. We are part of the "6G Research and Innovation Cluster (6G-RIC)" initiative, in which 16 research institutes, organizations and universities are developing mobile communications systems with open interfaces across all technological boundaries. Our institute participates with hardware components for the new frequency bands above 100 GHz. The focus is on heterointegrated transmitter modules that combine the advantages of InP bipolar technology with those of SiGe BiCMOS or CMOS on a single chip. This allows range and transmission quality to be improved and the components to be manufactured cost-effectively.

In the "Green ICT" research hub, communications technology and climate protection go hand in hand. With the growing demands on data rates and network availability, the focus is increasingly shifting to energy consumption and the environmental footprint of the infrastructure. Without further energy-saving measures, the energy demand for the wireless infrastructure (base stations) would rise from just over 2 terawatt hours in 2019 to over 10 terawatt hours in 2030, according to forecasts*. The FMD institutes are therefore addressing this problem and are available to the industry as a partner. We are participating with our expertise and capabilities in power-efficient semiconductor technologies and high-frequency front ends. The project outline has been positively reviewed and the corresponding project proposal has been submitted.

*Source: UTAMO project (2019–2021, Fraunhofer IZM): technology assessment of change processes for the field of mobile network infrastructures including terminals and the resulting environmental impacts. Funded by the Umweltbundesamt (FKZ: 3718 36 324 0).



Technologisch souverän – bei Zukunftsthemen wie 6G und Green ICT

Wenn internationale Lieferketten nicht mehr reibungslos funktionieren und Komponenten in der Produktion fehlen – das Ergebnis derartiger Abhängigkeiten hat uns die Corona-Pandemie in Branchen wie der Automobilfertigung deutlich vor Augen geführt. Wie wichtig die technologische Souveränität in Deutschland und Europa ist, wurde jedoch bereits früher erkannt. Gegenmaßnahmen wurden unter anderem mit der 2017 gestarteten Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) ergriffen. Der Verbund aus 13 Forschungsinstituten, zu denen auch das FBH zählt, wurde bis 2021 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 350 Millionen Euro gefördert, die in Hightech-Anlagentechnik investiert wurden. Die Partner bündeln in der FMD ihre technologischen Ressourcen und ihr Know-how. Der Verbund ist zentraler Ansprechpartner für Forschungsdienstleistungen und Entwicklungen, die Unternehmen im Bereich der Mikroelektronik benötigen – über Institutsgrenzen hinweg. Auch in

weiteren Schlüsselbereichen wie Energie, Sicherheit oder Digitalisierung ist es das erklärte Ziel, mit Know-how und State-of-the-Art-Technologien zukunftsfähig zu bleiben und damit Wohlstand und Arbeitsplätze im eigenen Land und in Europa zu sichern. Einblicke in weitere Aktivitäten der FMD bietet der Artikel auf S. 45.

Digitalisierung, Energieeffizienz und zukünftige Kommunikationstechnologien

Im Zeitalter der Digitalisierung steht die Souveränität bei den Kommunikationsnetzen, speziell den drahtlosen, ganz oben auf der Agenda. Damit Deutschland dafür und den zukünftigen Kommunikationsstandard 6G gut gerüstet ist, fördert das BMBF deutschlandweit vier Forschungshubs. Wir sind Teil der Initiative "6G Research and Innovation Cluster (6G-RIC)", in dem 16 Forschungsinstitute, -organisationen und Universitäten Mobilfunksysteme mit offenen Schnittstellen über alle

- Combines the advantages of two technology worlds through 3D heterointegration: the complexity of SiGe BiCMOS circuits with the high output power and energy efficiency of InP DHBTs. Kombiniert die Vorteile zweier Technologiewelten durch 3D-Heterointegration: die Komplexität von SiGe-BiCMOS-Schaltkreisen mit den hohen Ausgangsleistungen und der Energie-Effizienz von InP-DHBTs.

Technologiegrenzen hinweg entwickeln. Unser Institut beteiligt sich mit Hardware-Komponenten für die neuen Frequenzbänder oberhalb von 100 GHz. Im Mittelpunkt stehen heterointegrierte Transmitter-Module, die die Vorteile der InP-Bipolar-Technologie mit denen von SiGe-BiCMOS beziehungsweise CMOS auf einem Chip vereinen. Damit lassen sich Reichweite und Übertragungsqualität erhöhen sowie die Komponenten kosteneffizient fertigen.

Im Forschungshub „Green ICT“ gehen Kommunikationstechnik und Klimaschutz Hand in Hand. Denn mit den zunehmenden Anforderungen an die Datenrate und Verfügbarkeit der Netze rücken der Energieverbrauch und die Umweltbilanz der Infrastruktur immer stärker in den Fokus. Ohne weitere Maßnahmen zur Energieeinsparung würde der Energiebedarf für die drahtlose Infrastruktur (Basisstationen) laut Prognosen* von etwas mehr als 2 Terawattstunden in 2019 auf über

10 Terawattstunden im Jahr 2030 steigen. Die FMD-Institute adressieren daher dieses Problem und stehen der Industrie als Ansprechpartner zur Verfügung. Wir beteiligen uns mit unserer Kompetenz und unseren Fähigkeiten im Bereich der leistungseffizienten Halbleitertechnologien und Hochfrequenz-Frontends. Die Projektskizze wurde positiv begutachtet und der zugehörige Projektantrag ist eingereicht.

*Quelle: UTAMO-Projekt (2019–2021, Fraunhofer IZM): Technikfolgenabschätzung der Veränderungsprozesse für den Bereich der Netzinfrastrukturen des Mobilfunks inklusive der Endgeräte und der sich daraus ergebenden Umweltbelastungen. Gefördert durch Umweltbundesamt (FKZ: 3718 36 324 0).



High-performance multi-channel mm-wave measurement facility at FBH, suitable, e.g., for the characterization of 5G-MIMO components. Leistungsfähiger Mehrkanal-Millimeterwellen-Messplatz am FBH, beispielsweise für die Charakterisierung von 5G-MIMO-Komponenten.

For almost 30 years, we have been researching electronic devices at FBH that target high-frequency applications. As a result, we also benefit from a unique experience in the field of microwave characterization. With recent investments within the Research Fab Microelectronics Germany (FMD), we can additionally rely on one of the world's best-equipped laboratories for such measurements. This includes unique broadband and digital MIMO as well as terahertz load-pull measurement capabilities. We cover the frequency range from DC to several terahertz, measure low-power components as well as those in the kilowatt range and work in both time and frequency domain.

We primarily run programmable, semi-automatic measurement setups that provide feedback on our in-house technologies, in order to advance them continuously. These measurements are initiated using a quality management system and carried out by our experienced professionals, who also configure, program,

and calibrate the systems. The results and data are then managed and can be visualized using statistical evaluation software. In addition, we have developed application-specific measurement systems that cover current research topics such as 5G-MIMO and terahertz components. These systems are often developed and operated by our application-specific laboratories.

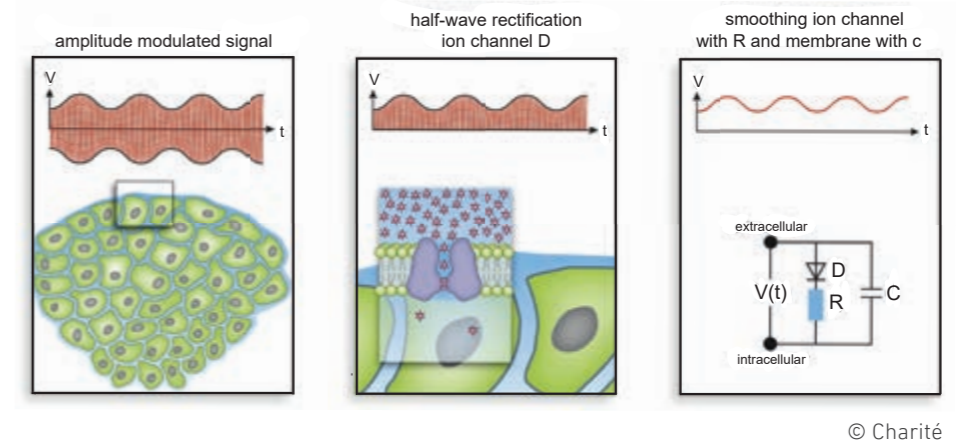
Based on our many years of experience in high-frequency measurements, we have been participating in several metrology projects in national and international collaborations. One example is the EMPIR H2020 PlanarCal project "Microwave measurements for planar circuits and components" with partners such as the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Germany and the National Physical Laboratory (NPL) in the UK. The project, which has meanwhile been completed, aimed at improving on-wafer calibrations up to 325 GHz. We are now continuing this work in the follow-up project TEMMT "Traceability for elec-

trical measurements at millimeter-wave and terahertz frequencies for communications and electronics technologies". The goal of TEMMT is to make the measurement of S-parameters, power and the complex dielectric constant of dielectric materials at millimeter-wave and terahertz frequencies traceable. Such collaborations demonstrate FBH's central role in the international RF community. With our first-class measurement laboratories and experienced personnel, we also support local and regional partners and customers:

Charité

The interdisciplinary RF research group led by Prof. Pirus Ghadjar at Charité Universitätsmedizin Berlin in the Department of Radiation Oncology is working on individual RF-based therapies. The group has extensive experience in this field and is dedicated to optimizing RF-based treatments in oncology. A current focus, which exceeds the current state of the art, is the preclinical development

Partner and provider of services for microwave measurements



Typical tumor environment characterized by isolated tumor cells and surrounded by extracellular water (left). Simplified model of ion channels in the membrane (e.g. potassium) with internal pore, cavity and selectivity filter (middle). Equivalent circuit diagram of an ion channel according to the ion channel model (right).

Typische Tumorumgebung, die von isolierten Tumorzellen geprägt und von extrazellulärem Wasser umgeben ist (links). Vereinfachtes Modell von Ionenkanälen in der Membran (z. B. Kalium) mit interner Pore, Hohlraum und Selektivitätsfilter (Mitte). Ersatzschaltbild eines Ionenkanals gemäß dem Ionenkanalmodell (rechts).

Partner und Dienstleister für Mikrowellenmessungen

Seit fast 30 Jahren erforschen wir am FBH elektronische Bauelemente, die auf Hochfrequenz-Anwendungen zielen. Dadurch können wir auch auf einzigartige Erfahrungen im Bereich der Mikrowellen-Charakterisierung zurückgreifen. Mit den jüngsten Investitionen im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) verfügen wir zudem über eines der weltweit best-ausgestatteten Labore für derartige Messungen. Dazu zählen einzigartige Breitband- und digitale MIMO- ebenso wie Terahertz-Load-Pull-Messmöglichkeiten. Wir decken den Frequenzbereich von DC bis zu mehreren Terahertz ab, messen Komponenten mit kleinen Leistungen im Milliwatt- bis hin zum Kilowatt-Bereich und arbeiten sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich.

Unsere Anlagen nutzen wir vorrangig in programmierbaren, halbautomatischen Messanordnungen, die Rückmeldungen zu unseren hauseigenen Technologien liefern, um sie so kontinuierlich weiterzuentwickeln. Diese Messungen werden über ein QM-System initiiert und von unseren erfahrenen Expertinnen und Experten durchgeführt, die die Systeme auch konfigurieren, programmieren und kalibrieren. Die Ergebnisse und Daten werden anschließend verwaltet und lassen sich mittels einer statistischen Auswertungssoftware visualisieren. Darüber hinaus haben wir anwendungsspezifische Messsysteme entwickelt, die auf aktuelle Forschungsthemen wie 5G-MIMO und Terahertz-Komponenten ausgerichtet sind. Diese Systeme werden häufig von unseren applikationsspezifischen Labors entwickelt und betrieben.

Auf Basis unserer langjährigen Erfahrungen in der Hochfrequenz-Messtechnik haben wir mehrere Metrologieprojekte in nationalen und internationalen Kooperationen bearbeitet und tun das weiterhin. Ein Beispiel ist das EMPIR H2020 PlanarCal-Projekt "Microwave measurements for planar circuits and components" mit Partnern wie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Deutschland und dem National Physical Laboratory (NPL) im Vereinigten Königreich. Das inzwischen abgeschlossene Vorhaben zielte auf verbesserte On-Wafer-Kalibrierungen bis zu 325 GHz. Diese Arbeiten setzen wir nun im Folgeprojekt TEMMT "Traceability for electrical measurements at millimeter-wave and terahertz frequencies for communications and electronics technologies" fort. Ziel von TEMMT ist es, die Messung von S-Parametern, Leistung und der komplexen Dielektrizitätskonstante von dielektrischen Materialien bei Millimeterwellen- und Terahertz-Frequenzen rückverfolgbar zu machen. Derartige Kooperationen zeigen auch die zentrale Rolle des FBH in der internationalen HF-Community.

Mit unseren erstklassigen Messlaboren und erfahrenem Personal unterstützen wir zudem lokale und regionale Partner und Kunden:

Charité

Die von Prof. Pirus Ghadjar geleitete interdisziplinäre HF-Forschungsgruppe an der Charité Universitätsmedizin Berlin in der Abteilung für Strahlenonkologie arbeitet an individuellen HF-basierten Therapien. Die Gruppe hat umfangreiche Erfahrung auf diesem Gebiet und arbeitet daran, HF-basierte Behandlungen in der Onkologie zu optimieren. Ein aktueller Schwerpunkt, der über den aktuellen Stand der Technik hinausgeht, ist die präklinische Entwicklung neuartiger technischer Lösungen, mit denen nicht-thermische krebshemmende Effekte durch die Behandlung mit hochfrequenten Feldern untersucht werden. Durch die Zusammenarbeit mit dem FBH lassen sich diese Ideen technisch umsetzen – und die Ergebnisse liefern präklinische Proof-of-Concept-Daten für eine rasche klinische Verwertung.



Radar front-end and evaluation platform for Silicon Radar's MMICs.

Radar-Frontend und Evaluierungsplattform für die MMICs von Silicon Radar.

Silicon Radar

Silicon Radar ist ein Hightech-KMU aus Frankfurt an der Oder, das sich auf Radartransceiver für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen spezialisiert hat. Neu entwickelte Radar-Transceiver im Frequenzband von 57 bis 64 GHz wurden in Kooperation mit dem FBH charakterisiert. Die Zusammenarbeit ermöglicht umfassende Tests der Radarschaltungen des Unternehmens vor der Produktionsfreigabe. Die entwickelten und charakterisierten Transceiver werden künftig im stetig wachsenden Sensormarkt für die industrielle Automatisierung, Vitaldatenerfassung und viele weitere Anwendungen eingesetzt.

FBH expands its area of expertise in developments for space applications



FBH manufactures laser diode benches for Merlin – the climate satellite will monitor the concentration of the greenhouse gas methane in the future (© CNES/D. Ducros).

Das FBH fertigt Laserdiodenbenches für Merlin – der Klimasatellit soll künftig die Konzentration des klimaschädlichen Treibhausgases Methan überwachen (© CNES/D. Ducros).

Whether political conflicts or the Corona pandemic, the effects of such incidents also expose our dependencies. They show us how important it is to remain capable of acting both socially and economically. All the more so for areas that are part of the critical infrastructure. Technology sovereignty is gaining importance not only in production and industrial manufacturing, but also in applications that are used in space, for example. This is because exploratory R&D results are often technology drivers for everyday applications – and thus key to international competitiveness.

FBH has many years of extensive experience in the development of III-V semiconductor-based devices and subsystems for space and satellite-based applications and technologies. Our projects are funded by the European Space Agency (ESA) and

the German Aerospace Center (DLR), and we collaborate with NASA and international companies from the space sector. Our R&D projects include optical communications, quantum optical metrology, beam steering technologies, and energy-efficient electronics for satellites.

Experience from space projects & ongoing further development

III-V semiconductor devices can be built into very compact and rugged packages. Being inherently energy efficient as well, they are ideal for use in space and on satellites. By microintegrating our semiconductor chips into multifunctional modules, they offer high functionality while maintaining compact dimensions. In addition, we have continued to improve the performance of our devices through constant further development.

FBH baut Kompetenzbereich bei Entwicklungen für Weltraumanwendungen aus

Ob politische Konflikte oder die Corona-Pandemie, die Auswirkungen solcher Ereignisse offenbaren auch unsere Abhängigkeiten. Sie zeigen, wie wichtig es ist, gesellschaftlich und wirtschaftlich handlungsfähig zu bleiben. Das gilt umso mehr für Bereiche, die zur kritischen Infrastruktur zählen. Technologiesouveränität gewinnt nicht nur in Produktion und industrieller Fertigung an Bedeutung, sondern auch in Anwendungen, die beispielsweise im Weltraum genutzt werden. Denn explorative F&E-Ergebnisse sind oft Technologietreiber für Alltagsanwendungen – und damit entscheidend für die internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Das FBH verfügt über langjährige und umfassende Erfahrung in der Entwicklung von III/V-Halbleiter-basierten Bauelementen und Subsystemen für weltraum- und satellitengestützte Anwendungen und Technologien. Unsere Projekte werden von der Europäischen Weltraumorganisation ESA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gefördert, und wir arbeiten mit der NASA und internationalen Unternehmen aus dem Space-Sektor zusammen. Unsere FuE-Projekte befassen sich unter anderem mit optischer Kommunikation, quantenoptischer Messtechnik, Strahlsteuertechnologien und energieeffizienter Elektronik für Satelliten.

Erfahrungen aus Weltraumprojekten & kontinuierliche Weiterentwicklung

III/V-Halbleiterbauelemente können in sehr kompakte und robuste Gehäuse eingebaut werden. Da sie zudem von Natur aus energieeffizient sind, eignen sie sich ideal für den Einsatz im Weltraum und auf Satelliten. Durch Mikrointegration unserer Halbleiterchips in multifunktionale Module bieten diese eine hohe Funktionalität bei kompakten Abmessungen. Zudem haben wir die Leistungsfähigkeit unserer Bauelemente durch stetige Weiterentwicklungen immer weiter verbessert.

So liefern wir seit vielen Jahren GaAs-basierte Diodenlaser-Pumpmodule für Laserkommunikationsterminals und Hochleistungs-Lasermodule mit schmaler Linienbreite für quantenoptische Anwendungen in Mikrogravitation. In enger Zusammenarbeit mit der Humboldt-Universität zu Berlin haben wir mehrere Generationen von Lasersystemen entwickelt. Damit wurde unter anderem im MAIUS-Experiment auf einer Höhenforschungsrakete das erste Bose-Einstein-Kondensat im Weltraum erzeugt.

Auch unsere GaN-basierten Bauelemente haben ihre Leistungsfähigkeit erfolgreich unter Beweis gestellt. Seit 2013 arbeiten

🔗 CAD view of a telerobotic assembly station currently being built jointly by FBH and Robo Technology (© Robo Technology GmbH).
CAD-Ansicht einer telerobotischen Montagestation, die derzeit gemeinsam von FBH und Robo Technology aufgebaut wird (© Robo Technology GmbH).

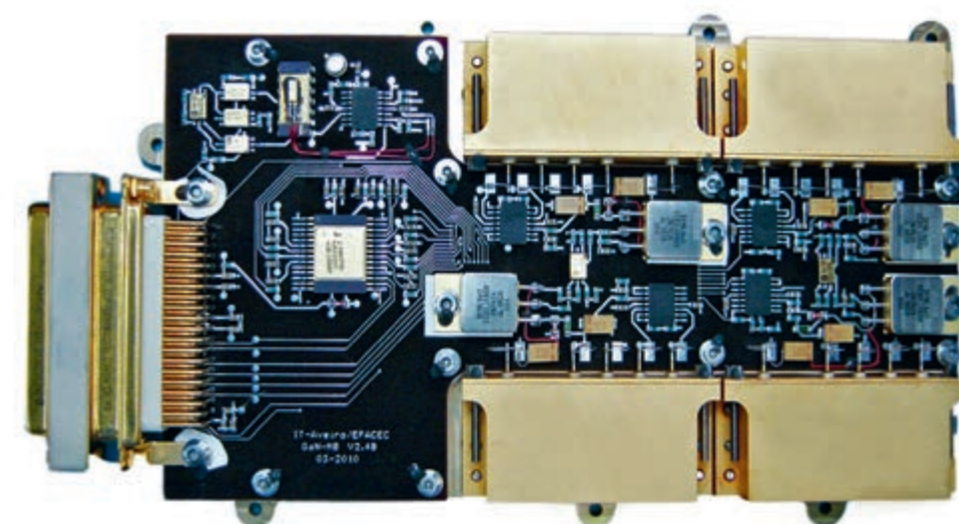
For example, we have been supplying GaAs-based diode laser pump modules for laser communication terminals and high-power narrow linewidth laser modules for quantum optical applications in microgravity for many years. In close collaboration with Humboldt-Universität zu Berlin, we have developed several generations of laser systems. These were used, among other things, to generate the first Bose-Einstein condensate in space in the MAIUS experiment on board a sounding rocket.

Our GaN-based devices have also successfully demonstrated their capability. Since 2013, discrete GaN chips from FBH have been operating without failures on the Alphasat satellite in a 2.5 GHz oscillator under the harsh conditions of geostationary orbit. Currently, we are working with European partners in the Kassiopeia project to establish a fully independent European value chain for space-qualified processes up to 60 GHz. Developments are targeting high-performance GaN MMICs for Ka-band satellite communications. Further research is underway on power converters that combine high switching frequencies with high efficiency. This enables converters with particularly high power density – a key aspect, since every gram counts in space.

Targeted expansion to establish an Aerospace Competence Center

As a result of the increased demand for modules and subsystems offering a wide range of integrated functionalities, we are currently expanding our activities in the field of space applications into an Aerospace Competence Center. We are thus strengthening our expertise and capacities in the development of subsystems and the production of small-scale series. To this end, we will be relying on support from robotics in the future. This will enable photonics and electronic modules to be mounted more efficiently and faster. Operators will have to intervene far less often during assembly, thus avoiding unnecessary interactions in the production areas for flight hardware manufacturing, which place the highest demands on cleanliness.

With stable, reproducible processes, an excellent laboratory infrastructure and comprehensive quality assurance, we will be able to offer solutions along the entire development chain right through to flight hardware in the future. We are thus positioning ourselves as a partner for the national and European space industry and space research.



🔗 The completed Alphasat flight demonstrator with four GaN oscillator modules (© Uni Aveiro/Efacec, Portugal).
Der fertige Alphasat-Flugdemonstrator mit vier GaN-Oszillatormodulen (© Uni Aveiro/Efacec, Portugal).

» Mit stabilen, reproduzierbaren Prozessen, einer exzellenten Laborinfrastruktur und einer umfassenden Qualitätssicherung bieten wir somit künftig Lösungen entlang der gesamten Entwicklungskette bis hin zur Flughardware.

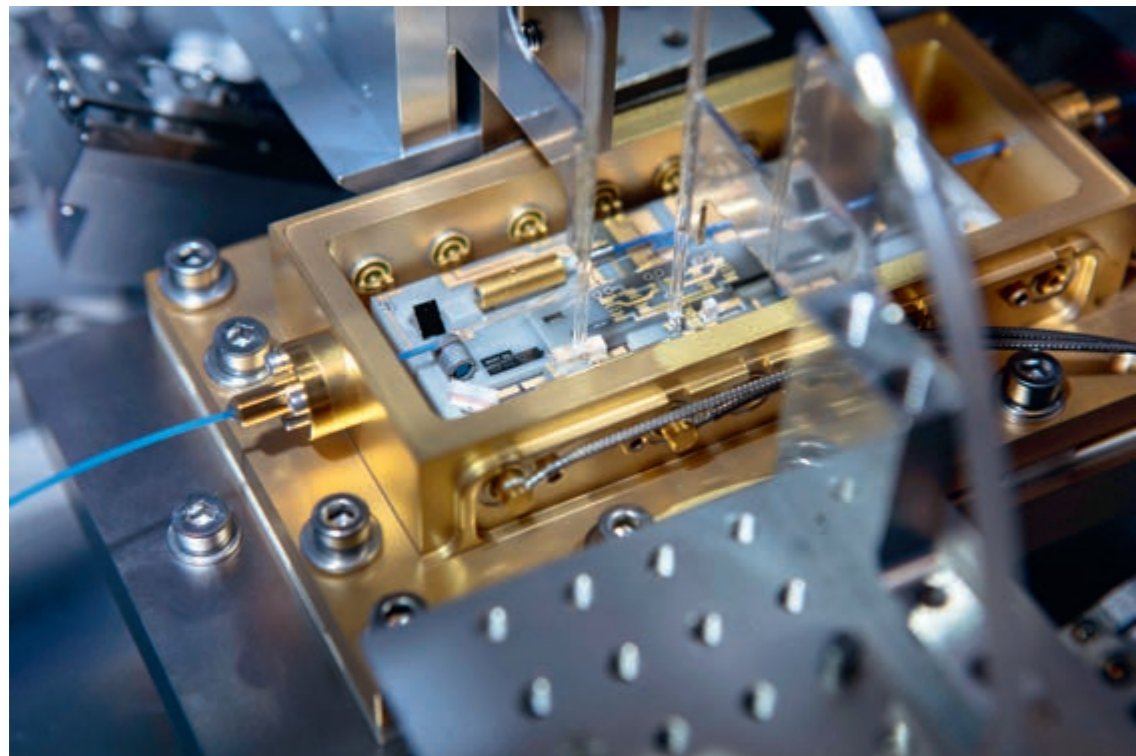
diskrete GaN-Chips aus dem FBH ohne Ausfälle auf dem Alpha-sat-Satelliten in einem 2,5-GHz-Oszillator unter den rauen Bedingungen in der geostationären Umlaufbahn. Aktuell arbeiten wir im Projekt Kassiopeia mit europäischen Partnern daran, eine vollständig unabhängige europäische Wertschöpfungskette für weltraumtaugliche Prozesse bis 60GHz zu etablieren. Die Entwicklungen zielen auf Hochleistungs-GaN-MMICs für die Satellitenkommunikation im Ka-Band. Weitere Forschungen laufen zu Leistungskonvertern, die hohe Schaltfrequenzen mit hohem Wirkungsgrad vereinen. Dies ermöglicht Konverter mit besonders hoher Leistungsdichte – ein zentraler Aspekt, da jedes Gramm im Weltraum zählt.

Gezielter Ausbau zum „Aerospace Competence Center“

Aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach Modulen und Subsystemen mit einer Vielzahl integrierter Funktionalitäten bauen wir derzeit unsere Aktivitäten für Weltraumanwen-

dungen zu einem „Aerospace Competence Center“ aus. Wir erweitern dabei unser Know-how und unsere Kapazitäten bei der Entwicklung von Teilsystemen und der Produktion von Kleinserien. Hierzu setzen wir künftig auf die Unterstützung durch Robotik. Damit lassen sich photonische und elektronische Module effizienter und schneller assemblieren. Bediener müssen bei der Montage deutlich seltener selbst Hand anlegen und vermeiden so unnötige Interaktionen in den Produktionsbereichen zur Fertigung von Flughardware, die höchste Anforderungen an die Sauberkeit stellen.

Mit stabilen, reproduzierbaren Prozessen, einer exzellenten Laborinfrastruktur und einer umfassenden Qualitätssicherung bieten wir somit künftig Lösungen entlang der gesamten Entwicklungskette bis hin zur Flughardware. Damit positionieren wir uns als Partner für die nationale und europäische Raumfahrtindustrie und -forschung.



High-precision assembly of a fiber-coupled, space-qualified diode laser module. Hochpräzise Montage eines fasergekoppelten, weltraumtauglichen Diodenlasermoduls.



Excellently equipped – the electroplating area in the new cleanroom. Exzellent ausgestattet – der Bereich Galvanik im neuen Reinraum.

Second cleanroom in operation – exquisite processing equipment offers new possibilities

In early 2022, an exquisitely equipped second cleanroom for wafer processes was put into operation at the Ferdinand-Braun-Institut. With approximately 1,000 square meters of additional laboratory space, it doubles our existing cleanroom capacity. The high-performance plant technology was funded with over 34 million Euros by the BMBF in the framework of Research Fab Microelectronics Germany (FMD). The major part of this funding was used to acquire state-of-the-art cleanroom equipment, measurement systems with partly unique features, and other highly specialized tools and software.

Most of the systems have been tailored to our specific needs and equipped with additional features. Consequently, an infrastructure optimized to our requirements is available for the development of state-of-the-art semiconductor devices. The necessary technical prerequisites in the new cleanroom were made possible with funding from the State of Berlin and the European Regional Development Fund (ERDF) amounting to almost 4.5 million Euros.

Highly specialized equipment to meet specific requirements – a selection

From lithography to etching, electroplating to analytics, our cleanrooms and laboratories offer consistently high-performance equipment with maximum flexibility. The custom equipped facilities also include an ion implanter that can generate ions in three different ways, from a gas, by evaporation, and by sputtering from a solid. Implantation is one of the central processes used in the microelectronics device manufacturing process. It allows foreign atoms to be introduced into semiconductor layers and the material properties to be changed in a targeted manner. The additional equipment with a heatable sample holder enables implantations at temperatures up to 700 °C in 3" and 100 mm wafers and thus fundamentally expands our experimental possibilities. The new ion implanter also allows high implantation currents of up to 2 mA and covers acceleration voltages from 5 keV to 500 keV.

For rapid thermal annealing (RTA) of wafers, we also benefit from a unique system for very high temperatures. This process can be used to form electrical contacts, electrically activate implanted atoms, and control conductivity in a targeted manner. In the new facility, semiconductor structures can be heated to previously unattainable temperatures – in peaks of up to 1600 °C – in just a few seconds. Our RTA therefore opens up many possibilities to further develop gallium nitride-based devices, for example. These are needed, among other things, for energy-efficient power electronics, green IT, or modern mobile communications standards such as 5G or 6G.

The outstanding equipment also includes our worldwide unique 5G-MIMO measurement system for broadband multi-channel transmitters, which can be used for 5G-MIMO and space applications, among others. It can be employed to simultaneously characterize multiple amplifier channels and thus evaluate MIMO arrays, for example. It also provides further opportunities for research that requires wideband measurement techniques. For details, see p. 32.



Zweiter Reinraum in Betrieb – exquisite Anlagentechnik bietet neue Möglichkeiten



Anfang des Jahres 2022 wurde am Ferdinand-Braun-Institut ein exzellent ausgestatteter zweiter Reinraum für Waferprozesse in Betrieb genommen. Mit seinen zusätzlich etwa 1.000 Quadratmetern Laborfläche verdoppelt er unsere bisherigen Reinraumkapazitäten. Die leistungsfähige Anlagentechnik wurde mit gut 34 Millionen Euro vom BMBF im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) gefördert. Der größte Teil dieser Summe wurde in Reinraum-Equipment auf dem neuesten technologischen Stand, in Messplätze mit teils einzigartiger Ausstattung sowie weitere hochspezialisierte Tools und Software investiert.

So wurden die meisten Anlagen auf unsere spezifischen Bedürfnisse zugeschnitten und mit Zusatzfeatures ausgestattet. Im Ergebnis steht eine auf unsere Anforderungen optimierte Infrastruktur für die Entwicklung von State-of-the-Art Halbleiter-Bauelementen zur Verfügung. Die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen im neuen Reinraum wurden mit För-

High-resolution electron beam lithography – the system can be used, among others, to reliably produce InP HBTs with sub- μm emitter widths.

Hochauflösende Elektronenstrahlolithografie – mit der Anlage lassen u. a. InP-HBTs mit sub- μm -Emitterweiten zuverlässig herstellen.

The new ion implanter enables doping implantations in wide-bandgap semiconductors at up to 700 °C. Der neue Ionenimplanter ermöglicht Dotierungsimplantationen in Wide-Bandgap-Halbleitern bei bis zu 700 °C.

RTA system for rapid thermal annealing of wafers – it heats up to previously unattained temperatures within seconds. RTA-Anlage zum schnellen thermischen Behandeln von Wafern – sie heizt sekundenschnell auf bislang unerreichte Temperaturen.

derung des Landes Berlin und dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) in Höhe von fast 4,5 Millionen Euro geschaffen.

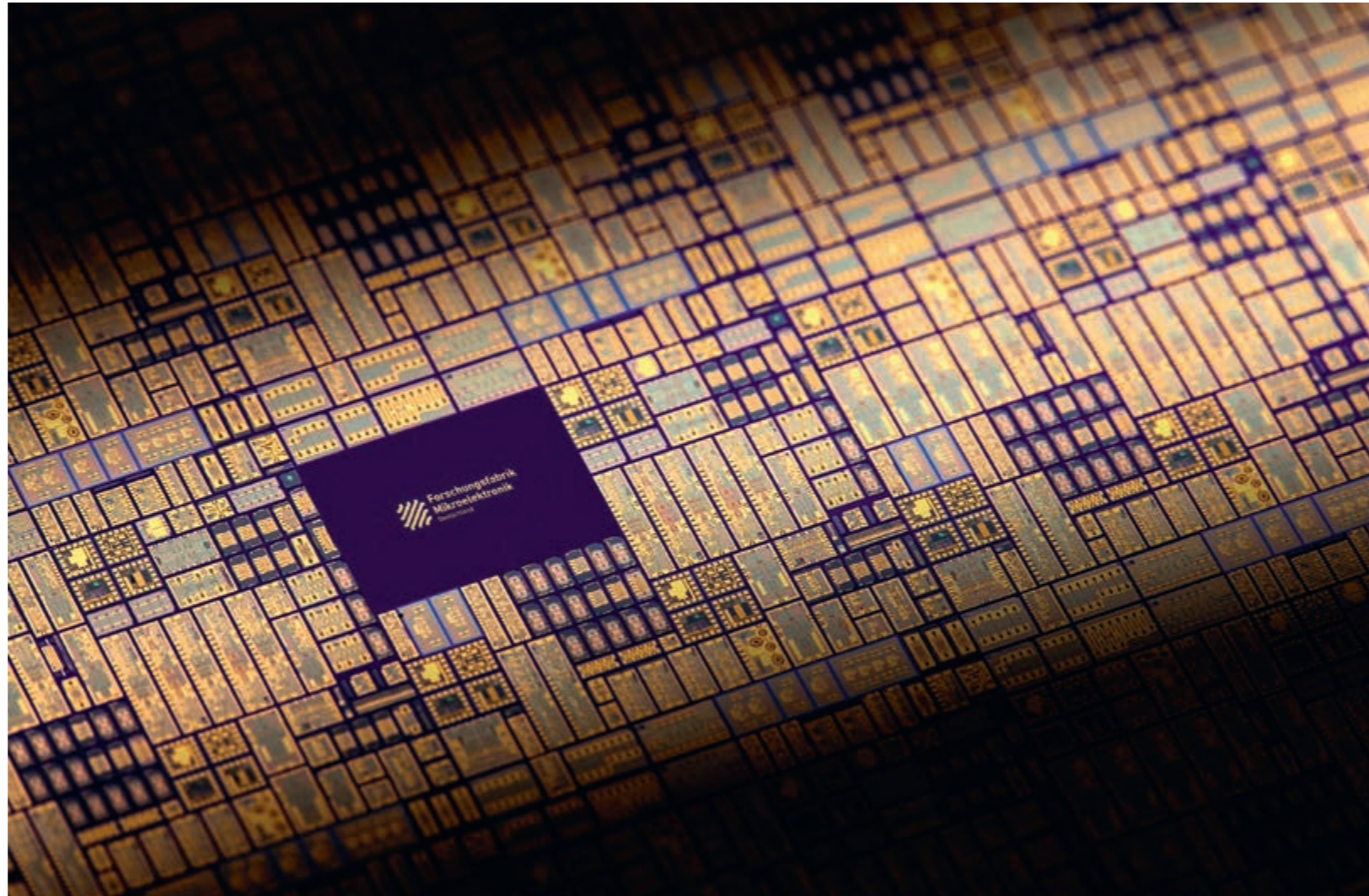
Hochspezialisiertes Equipment für besondere Anforderungen – eine Auswahl

Ob Lithografie, Ätzen, Galvanik oder Analytik – unsere Reinräume und Labore bieten eine durchgängig leistungsfähige Anlagentechnik mit höchster Flexibilität. Zu den speziell ausgerüsteten Anlagen zählt auch ein Ionenimplanter, der Ionen auf drei verschiedene Arten erzeugen kann, aus einem Gas, durch Verdampfen und durch Sputtern aus einem Festkörper. Die Implantation ist einer der zentralen Prozesse bei der Fertigung mikroelektronischer Bauelemente. Damit lassen sich Fremdatome in Halbleiterschichten einbringen und die Materialeigenschaften gezielt verändern. Die Zusatzausstattung mit einem beheizbaren Probenhalter ermöglicht Implantationen bei Temperaturen bis zu 700 °C in 3" und 100mm Wafer und erweitert damit grundlegend unsere experimentellen Möglichkeiten. Der neue Ionenimplanter erlaubt zudem hohe Implantationsströme von bis zu 2 mA und deckt Beschleunigungsspannungen von 5 keV bis 500 keV ab.

Auch zur schnellen thermischen Behandlung von Wafern, dem so genannten Rapid Thermal Annealing (RTA), steht uns nun eine einzigartige Anlage für sehr hohe Temperaturen zur Verfügung. Mit diesem Prozess können elektrische Kontakte formiert beziehungsweise implantierte Atome elektrisch aktiviert und Leitfähigkeiten gezielt beeinflusst werden. In der neuen Anlage können die Halbleiterstrukturen in Sekundenschnelle auf bisher unerreichbare Temperaturen – in Spitzen bis zu 1600 °C – erhitzt werden. Mit unserer RTA eröffnen sich daher viele Möglichkeiten, um etwa Galliumnitrid-basierte Bauelemente weiterzuentwickeln. Diese werden beispielsweise für die energieeffiziente Leistungselektronik, Green IT oder moderne Mobilfunkstandards wie 5G oder 6G benötigt.

Zu den herausragenden Anlagen zählt auch unser weltweit einzigartiges 5G-MIMO-Messsystem für breitbandige Mehrkanal-Transmitter, das unter anderem für 5G-MIMO- und Weltraumanwendungen genutzt werden kann. Damit lassen sich mehrere Verstärker-Kanäle simultan charakterisieren und so zum Beispiel MIMO-Anordnungen evaluieren. Zudem bietet es weitere Möglichkeiten für Forschungsarbeiten, die Breitband-Messtechniken erfordern. Details dazu gibt es auf S. 34.

The Research Fab Microelectronics Germany – now in regular operation



In 2017, we joined forces with twelve other institutes to form the cross-site Research Fab Microelectronics Germany (FMD). With more than 2,600 scientists, the FMD is one of the largest R&D cooperations in microelectronics and nanoelectronics worldwide. The cross-location, cross-technology, and cross-competence collaboration aims to maintain and expand technological sovereignty in Europe along the entire value chain.

Set-up successfully completed

After completing the start-up phase funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) – we updated the technological infrastructure at FBH in this context and put a second cleanroom into operation, see previous article – FMD started into regular operation at the beginning of 2021. This transition was marked by the digital conference "Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial – Köpfe & Know-how" on April 22, 2021, at which FMD presented its comprehensive range of services and further cooperation opportunities. Technology and user highlights made the offer tangible for customers from industry and research.

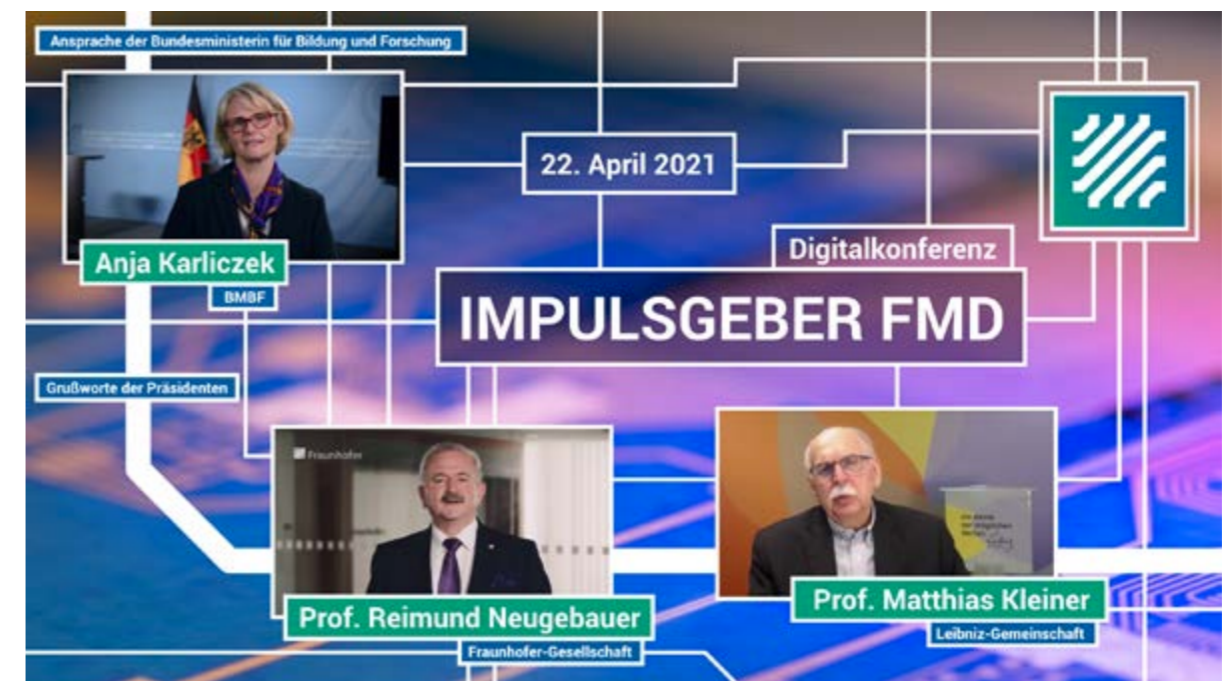
With the transition to regular operations, Dr. Andreas Grimm, Senior Manager Technologies & Cooperations, has been employed at the Ferdinand-Braun-Institut since January 2021. His field of expertise – perfectly in line with FBH's focus – is on III-V compound semiconductors. At FMD, he is the primary contact for the area of power electronics. In this role, he identifies cross-institutional research topics and initiates joint projects – always aimed at using semiconductor-based technologies in applications such as 5G/6G or in power electronics applications.

The T-KOS project, funded by the BMBF with 10 million Euros, is an example for this. It aims to open up terahertz technologies in the fields of communication and sensor technology for industry across institutes. This is to be achieved through joint developments and targeted synergies in the research fields of high-frequency electronics, terahertz photonics, and wireless, high-bitrate communication.

Focus on trustworthy electronics

One FMD focus is on trustworthy and sustainable microelectronics systems. A future-oriented society has to rely on these in the relevant technical application domains – whether in critical infrastructures, in Industry 4.0, in the automotive sector, and also when it comes to medical equipment.

The versatile technological competencies that are needed for this purpose are being co-developed by the institutes cooperating in the FMD in major projects such as "Velektronik". In March 2021, the platform for trustworthy electronics was launched aiming to develop corresponding concepts in Germany and Europe. A total of 12 partners have joined forces – 11 FMD institutes and the edacentrum. Within the project, relevant standards, norms, and processes are to be developed on the basis of a national and European chip security architecture and brought into application. We contribute our expertise in III-V semiconductor processes (GaN HEMTs and InP bipolar transistors) to the project by verifying solution approaches based on the processes running at FBH.



At the digital conference, FMD presented its range of services along with technology and user highlights for customers. Auf der Digitalkonferenz präsentierte die FMD ihr Leistungsangebot und Technologie- und Anwender-Highlights für Kunden.



Three questions to Andreas Grimm

Drei Fragen an Andreas Grimm

You graduated in nanotechnology and did your PhD in the field of surface physics. From the lab to FMD, so to speak – what do you find particularly appealing about it?

I first came into contact with the subject of epitaxy during my bachelor's thesis. The experimental work on a molecular beam epitaxy system fascinated me so much that I really wanted to do a PhD in this field. But then it became increasingly clear to me that the path from individual layers to application is a long one. And that's where I really wanted to go, so I switched to industry.

You have worked in industry and in basic research. Is there anything that has shaped you in particular?

That was definitely challenging, although I was able to put my prior knowledge of silicon carbide process integration to good use. In industry, the approach and timelines are a lot more determined from the outside. However, the job change and my time there have been extremely enriching and help me in my work at FMD. After all, that's exactly our mission, to bring research results from the lab into application.

And what else are you interested in?

Berlin is a great place to visit photography exhibitions. If time allows, I also like to travel and take pictures myself on my trips.

Du hast Nanotechnologie studiert und im Bereich der Oberflächenphysik promoviert. Sozusagen aus dem Labor in die FMD – was reizt dich daran?

Durch meine Bachelorarbeit bin ich das erste Mal mit dem Thema Epitaxie in Berührung gekommen. Die experimentelle Arbeit an einer Molekularstrahl-Epitaxieanlage hat mich so fasziniert, dass ich unbedingt in diesem Bereich promovieren wollte. Dann wurde mir aber immer klarer, dass der Weg von einzelnen Schichten hin zur Anwendung ein weiter ist. Und da wollte ich unbedingt hin, daher bin ich in die Industrie gewechselt.

Du hast in der Industrie und in der Grundlagenforschung gearbeitet. Gibt es etwas, was dich dabei besonders geprägt hat?

Das war durchaus herausfordernd, obwohl ich mein Vorwissen in die Prozessintegration von Siliziumcarbid gut einbringen konnte. In der Industrie sind die Herangehensweise und die Zeitachsen viel stärker von außen bestimmt. Der Wechsel und meine Zeit dort haben mich jedoch extrem bereichert und helfen mir bei meiner Arbeit in der FMD. Denn das ist ja genau unsere Mission, Forschungsergebnisse aus dem Labor in die Anwendung zu bringen.

Und wofür interessierst du dich sonst?

Berlin ist ein super Ort, um in Fotografie-Ausstellungen zu gehen. Wenn es die Zeit erlaubt, reise ich auch gerne und fotografiere auf meinen Reisen selber.

Im Regelbetrieb angekommen – die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

2017 haben wir uns mit zwölf weiteren Instituten zur standortübergreifenden Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) zusammengeschlossen. Mit mehr als 2.600 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ist die FMD einer der größten F&E-Zusammenschlüsse in der Mikro- und Nanoelektronik weltweit. Die standort-, technologie- und kompetenzübergreifende Zusammenarbeit zielt auf den Erhalt und Ausbau der technologischen Souveränität in Europa entlang der gesamten Wertschöpfungskette ab.

Aufbau erfolgreich abgeschlossen

Nach Abschluss der durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Aufbauphase – in diesem Kontext haben wir am FBH die technologische Infrastruktur erneuert und einen zweiten Reinraum in Betrieb genommen, vgl. vorangegangener Artikel – startete die FMD Anfang 2021 in den Regelbetrieb. Diesen Übergang markierte die Digital-Konferenz »Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial – Köpfe & Know-how« am 22. April 2021. Auf dieser Veranstaltung stellte die FMD ihr umfassendes Leistungsangebot und weitere Kooperationsmöglichkeiten vor. Technologie- und Anwender-Highlights machten das Angebot für Kunden aus Industrie und Forschung greifbar.

Mit dem Übergang in den regulären Betrieb ist Dr. Andreas Grimm, Senior Manager Technologien & Kooperationen, seit Januar 2021 am Ferdinand-Braun-Institut angestellt. Sein thematischer Fokus liegt – passend zum FBH – auf III/V-Verbindungshalbleitern. Bei der FMD ist er erster Ansprechpartner für den Bereich Leistungselektronik. In dieser Rolle identifiziert er institutsübergreifende Forschungsthemen und initiiert gemeinsame Projekte – stets mit dem Ziel, halbleiterbasierte Technologien in Anwendungen wie etwa 5G/6G oder in leistungselektronischen Applikationen einzusetzen.

Beispielhaft dafür ist das vom BMBF mit 10 Millionen Euro geförderte Projekt T-KOS, das darauf zielt, institutsübergreifend Terahertz-Technologien in den Bereichen Kommunikation und Sensorik für die Industrie zu erschließen. Dies soll durch gemeinsame Entwicklungen und gezielt genutzte Synergien in den Forschungsfeldern Hochfrequenzelektronik, Terahertz-Photonik und drahtlose, hochbitratige Kommunikation erreicht werden.

Vertrauenswürdige Elektronik im Fokus

Ein FMD-Fokus liegt auf vertrauenswürdigen und nachhaltigen Mikroelektroniksystemen. Auf diese ist eine zukunftsorientierte Gesellschaft in den relevanten technischen Anwendungsdomänen angewiesen – ob in kritischen Infrastrukturen, in der Industrie 4.0, im Automobilbereich oder auch bei medizinischen Geräten.

Die technologieübergreifenden Kompetenzen, die man dafür benötigt, entwickeln die in der FMD kooperierenden Institute in Großprojekten wie »Velektronik« mit. Im März 2021 ist die Plattform für vertrauenswürdige Elektronik gestartet mit dem Ziel, entsprechende Konzepte in Deutschland und Europa zu erstellen. Beteiligt sind insgesamt 12 Partner – 11 Institute der FMD sowie das edacentrum. Innerhalb des Projekts sollen entsprechende Standards, Normen und Prozesse auf der Grundlage einer nationalen und europäischen Chipsicherheitsarchitektur entwickelt und in die Anwendung gebracht werden. Wir bringen im Projekt unsere Kompetenz bei III/V-Halbleiter-Prozessen (GaN-HEMTs und InP-Bipolartransistoren) ein, indem wir Lösungsansätze auf Basis der am FBH laufenden Prozesse verifizieren.



» Ein FMD-Fokus liegt auf vertrauenswürdigen und nachhaltigen Mikroelektroniksystemen. Auf diese ist eine zukunftsorientierte Gesellschaft in den relevanten technischen Anwendungsdomänen angewiesen.



High-performance laser bars supplied by JENOPTIK.
Hochleistungs-Laserbarren aus dem Hause JENOPTIK.

30 years of FBH, 20 years of spin-offs, 10 spin-offs – a success story

Since its foundation in 1992, the Ferdinand-Braun-Institut has been researching and developing application-oriented semiconductor-based devices, modules, and systems for its partners in industry and research. For many small and medium-sized companies in the high-tech sector, we are an indispensable partner in the value chain.

Beyond classical R&D contracts, licensing, and research services, we started twenty years ago to transfer excellent and highly demanded developments also via spin-offs to customers in industry and research. With eagleyard Photonics and Jenoptik Diode Lab, two newly established companies started their business activities in 2002. They are also among the most successful spin-offs of our institute, ten of which are still active today.

Photonics from and in Adlershof

eagleyard Photonics has evolved since its foundation into a leading international supplier of high-power laser diodes with wavelengths from 630 nm to 1120 nm. One of the company's first activities was to transform high-precision DFB lasers developed by our institute for scientific purposes into high-volume laser diodes with a competitive price. This has opened up industrial applications such as measurement and medical technology. The laser chips as such still originate from the Ferdinand-Braun-Institut, which develops and manufactures the chips according to customer requirements for eagleyard. The company then assembles these chips into modules and systems. A business concept that has proven so successful that eagleyard was able to double its production space in 2012.

Following the acquisition by TOPTICA Photonics AG in 2013, additional synergies were identified along the value chain – with a focus on scalable manufacturing processes. In particular, microassembly was successfully expanded, so that the company will be moving to larger premises in 2023. TOPTICA eagleyard, as the company is meanwhile branded, today offers laser diodes in a wide range of product groups and is targeting new markets such as quantum technology. It has grown to over 55 employees and is commercially successful with an annual growth of over 20%.

Close cooperation with the JENOPTIK Group

Jenoptik Diode Lab was launched in February 2002 as a subsidiary of JENOPTIK AG. This foundation is the result of many years of successful cooperation between the Ferdinand-Braun-Institut and JENOPTIK AG in the field of high-power laser diodes. The spin-off produces laser diodes in the wavelength range between 650 nm and 1150 nm for applications in materials processing and medicine. These lasers are specified, developed, and optimized in close cooperation with FBH and are distinguished by outstanding beam characteristics and excellent lifetimes.

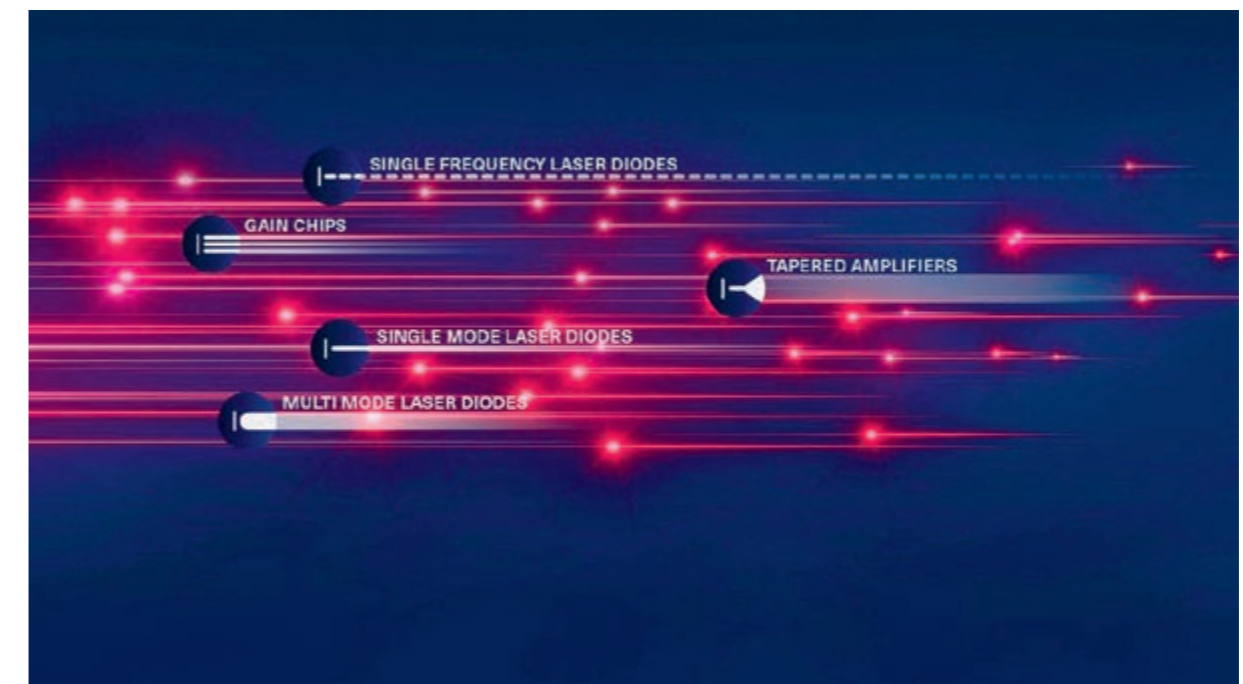
The company manufactures laser bars with output powers of up to 350W in continuous operation and 500W in pulsed operation off the shelf. Since commissioning its own production facility, the throughput of laser bars has been continuously increased by 700% compared to the first year of production in 2007. Due to the high demand, the area of the Adlershof manufacturing facility has since been expanded to 3,400 square meters, and capacities have been significantly increased thanks to higher

automation. The dynamic development is also reflected in the number of employees, which has roughly quintupled since 2007.

In 2019, Jenoptik Diode Lab was integrated into JENOPTIK Optical Systems GmbH. The following year, the two Berlin JENOPTIK semiconductor production sites were merged at the Adlershof location. Since then, the product portfolio has been expanded by LED-based specialized semiconductors emitting in the near-infrared and visible spectral range. The portfolio includes micro-displays and point sources, such as for optical coupling in sighting devices, and tailor-made LEDs for applications in medical technology.

Another FBH spin-off has also been part of the JENOPTIK Group since 2009. **Three-Five Epitaxial Services AG** (TESAG) was founded in 1999 by FBH employees. As an epiwafer foundry, it produced semiconductor layer structures that are the basis for devices that include laser diodes, light-emitting diodes (LEDs), transistors (HBTs) and Schottky diodes. The company thus translated FBH's scientific know-how as a competence center for gas phase epitaxy into industrial production. With TESAG, JENOPTIK has integrated the important step of epitaxial layer production into its own value chain.

The five current product families of TOPTICA eagleyard.
Die fünf aktuellen Produktfamilien von TOPTICA eagleyard.





TOPTICA eagleyard celebrates 20 years – the team in May 2022.
TOPTICA eagleyard feiert 20 Jahre – das Team im Mai 2022.

30 Jahre FBH, 20 Jahre Ausgründungen, 10 Spin-offs – eine Erfolgsgeschichte

Seit seiner Gründung im Jahr 1992 erforscht und entwickelt das Ferdinand-Braun-Institut anwendungsorientiert Halbleiterbasierte Bauelemente, Module und Systeme für seine Partner aus Industrie und Forschung. Für viele kleine und mittlere Unternehmen im Hightech-Bereich sind wir unverzichtbarer Partner in der Wertschöpfungskette.

Jenseits klassischer F&E-Aufträge, Lizenzierungen und Forschungsdienstleistungen, haben wir vor zwanzig Jahren begonnen, exzellente und stark nachgefragte Entwicklungen auch über Ausgründungen an Kunden in Industrie und Forschung zu transferieren. Mit eagleyard Photonics und Jenoptik Diode Lab nahmen gleich zwei Spin-offs im Jahr 2002 ihre Geschäftstätigkeit auf. Sie zählen zugleich zu den erfolgreichsten Ausgründungen unseres Instituts, von denen heute zehn noch immer aktiv sind.

Photonik aus und in Adlershof

eagleyard Photonics hat sich seit der Gründung zu einem international führenden Anbieter von Hochleistungs-Laserdioden mit Wellenlängen von 630 nm bis 1120 nm entwickelt. Begonnen hat das Unternehmen unter anderem damit, hochpräzise DFB-Laser unseres Instituts für wissenschaftliche Anwendungen in volumentaugliche Laserdioden mit einem wettbewerbsfähigen Preis zu transformieren. Damit hat es industrielle Anwendungen wie etwa in Messtechnik und Medi-

zintechnik erschlossen. Die Laserchips selbst stammen nach wie vor aus dem Ferdinand-Braun-Institut, das die Chips nach den Kundenerfordernissen für eagleyard entwickelt und fertigt. Das Unternehmen baut diese Chips zu Modulen und Systemen auf. Ein Geschäftskonzept, das sich so bewährt hat, dass eagleyard seine Produktionsfläche im Jahr 2012 verdoppeln konnte.

Mit der Übernahme durch die TOPTICA Photonics AG im Jahr 2013 ergaben sich zusätzliche Schnittmengen entlang der Wertschöpfungskette – mit Fokus auf skalierbaren Herstellungsprozessen. Dabei wurde insbesondere die Mikromontage erfolgreich ausgebaut, so dass das Unternehmen 2023 in größere Räumlichkeiten umziehen wird. TOPTICA eagleyard, wie das Unternehmen inzwischen heißt, bietet heute Laserdioden in den verschiedensten Produktgruppen an und zielt auf neue Märkte wie die Quantentechnologie. Das Unternehmen ist auf über 55 Mitarbeiter*innen angewachsen und mit einem jährlichen Wachstum von über 20 % wirtschaftlich erfolgreich.

Enge Kooperation mit dem JENOPTIK-Konzern

Die **Jenoptik Diode Lab** wurde im Februar 2002 als ein Tochterunternehmen der JENOPTIK AG gegründet. Diese Gründung ist das Ergebnis der jahrelangen erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen dem Ferdinand-Braun-Institut und der

JENOPTIK AG auf dem Gebiet der Hochleistungs-Laserdioden. Das Spin-off produziert Laserdioden im Wellenlängenbereich zwischen 650 nm und 1150 nm für Anwendungen in der Materialbearbeitung und Medizin. Diese werden in enger Zusammenarbeit mit dem FBH spezifiziert, entwickelt und optimiert. Sie zeichnen sich durch hervorragende Strahlcharakteristiken und exzellente Lebensdauern aus.

Das Unternehmen fertigt serienmäßig Laserbarren mit Leistungen bis zu 350 W im Dauerbetrieb und 500 W im Pulsbetrieb. Seit Inbetriebnahme der eigenen Fertigungsstätte konnte der Durchsatz an Laserbarren im Vergleich zum ersten Jahr der Produktion im Jahr 2007 kontinuierlich um 700% erhöht werden. Aufgrund der hohen Nachfrage wurde die Fläche der Adlershofer Fertigungsstätte inzwischen auf 3.400 Quadratmeter erweitert, und die Kapazitäten konnten dank höherer Automatisierung deutlich ausgeweitet werden. Die dynamische Entwicklung spiegelt auch die Anzahl der Mitarbeitenden wider, deren Zahl sich seit 2007 etwa verfünffacht hat.

2019 wurde die Jenoptik Diode Lab in die JENOPTIK Optical Systems GmbH integriert und im Folgejahr die beiden Berliner JENOPTIK-Standorte für die Halbleiterfertigung im Werk Adlershof zusammengelegt. Seitdem ist das Produkt-Portfo-

lio am Standort um LED-basierte Spezialhalbleiter im nahinfraroten und sichtbaren Spektralbereich erweitert. Dazu zählen Mikro-Displays und Punktstrahler, etwa für die optische Einkopplung in Visiereinrichtungen, und maßgeschneiderte LEDs für Anwendungen in der Medizintechnik.

Auch ein weiteres FBH Spin-off gehört seit 2009 zum JENOPTIK-Konzern. Die **Three-Five Epitaxial Services AG (TESAG)** wurde 1999 von Mitarbeitenden des FBH gegründet. Als Epiwafer-Foundry stellte sie Halbleiter-Schichtstrukturen her, die die Basis für Bauelemente wie Laserdioden, Leuchtdioden (LEDs), Transistoren (HBTs) oder Schottky-Dioden sind. Das Unternehmen setzte damit das wissenschaftliche Know-how des FBH als Kompetenzzentrum für die Gasphasenepitaxie in die industrielle Produktion um. JENOPTIK hat mit der TESAG den wichtigen Schritt der Schichtherstellung in die eigene Wertschöpfungskette integriert.

The JENOPTIK production facility with the extension building in Berlin-Adlershof.
Die JENOPTIK-Fertigungsstätte mit Erweiterungsbau in Berlin-Adlershof.



Advanced UV for Life – successful activities are continued in a registered association

The Advanced UV for Life consortium, which was launched in 2013 and whose office is located at FBH, is an alliance of around 50 companies and research institutions. The partners are developing UV light-emitting diodes from materials to systems with tailored properties, thus opening up new applications. Another goal is to replace the currently common mercury-based emitters with non-toxic UV LEDs in many areas.

Great progress was made in 2021, particularly in the disinfection of surfaces and in medicine. Optimized UVC LEDs with an emission at 233 nm, for example, will in the future render pathogens harmless directly on the skin – without damaging it. Further information on this and the higher efficiency of these UV LEDs can be found on p.80. Also, cooperation in the consortium has played a key role in making ams OSRAM the only European manufacturer to enter the global market for UV LEDs. The light-emitting diodes in the wavelength range from 260 to 280 nanometers are to be used for drinking water disinfection and industrial disinfection processes. The partners are now continuing their proven collaboration in a registered association of the same name following BMBF funding at the end of 2021. In addition to other research activities, the association serves as a communication platform, cooperation forum, and interest group for UV semiconductor technologies. The founding members include ams OSRAM, Heraeus Noblelight, Aixtron, TU Berlin, Fraunhofer-Gesellschaft, and FBH.

Lively virtual exchange: ICULTA conference & thematic workshops

The consortium was not only busy with its research activities, it also held three thematic workshops on UV LEDs in various application areas in 2021. The events took place online due to corona and were well attended with 60 to 80 participants each. Not only were they able to gain important insights into how corona viruses can be effectively combated, but new collaborations were initiated.

With ICULTA 2021 – the "International Conference on UV LED Technologies & Applications" – the consortium together with the International UV Association (IUVA) offered the community for the second time a forum for professional exchange. The conference brought together the world's leading LED manufacturers, users, and researchers. This event also had to be held virtually, which did not detract from the lively interest shown by the 320 participants from 33 countries. In particular, there was strong demand for information on the role of UV LEDs in combating COVID-19, especially in the disinfection of air and surfaces.

- ▶ **Sven Einfeldt during his opening session at ILCULTA 2021.**
 Sven Einfeldt bei seiner Opening Session der ILCULTA 2021.



▶ **The founding members of the newly established Advanced UV for Life e.V.**
 Die Gründungsmitglieder des neu gegründeten Advanced UV for Life e.V.

Advanced UV for Life – erfolgreiche Aktivitäten werden im Verein fortgeführt

Das 2013 gestartete Konsortium Advanced UV for Life, dessen Geschäftsstelle am FBH angesiedelt ist, ist ein Bündnis aus rund 50 Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Die Partner entwickeln UV-Leuchtdioden vom Material bis zu Systemen mit maßgeschneiderten Eigenschaften und erschließen damit neue Anwendungen. Ein weiteres Ziel ist es, die derzeit gängigen quecksilberbasierten Strahler in vielen Bereichen durch ungiftige UV-LEDs zu ersetzen.

Insbesondere bei der Desinfektion von Oberflächen und in der Medizin wurden 2021 große Fortschritte erreicht. So sollen optimierte UVC-LEDs mit einer Emission von 233 nm Krankheitserreger künftig direkt auf der Haut unschädlich machen – ohne sie zu schädigen. Weitere Informationen dazu und zur höheren Effizienz dieser UV-LEDs finden sich auf S. 80. Die Zusammenarbeit im Konsortium hat maßgeblich dazu beigetragen, dass ams OSRAM als einziger europäischer Hersteller den Weltmarkt für UV-LEDs betreten hat. Die Leuchtdioden im Wellenlängenbereich von 260 bis 280 Nanometern sollen zur Trinkwasserdesinfektion und für industrielle Desinfektionsprozesse eingesetzt werden. Die bewährte Zusammenarbeit führen die Partner nach der BMBF-Förderung Ende 2021 nun in dem gleichnamigen Verein fort. Neben weiteren Forschungsaktivitäten dient der Verein als Kommunikationsplattform, Kooperationsbörse und Interessensverband für UV-Halbleitertechnologien. Zu den Gründungsmitgliedern zählen

unter anderem ams OSRAM, Heraeus Noblelight, Aixtron, TU Berlin, Fraunhofer-Gesellschaft und das FBH.

Regel virtueller Austausch: ICULTA-Konferenz & Themenworkshops

Das Konsortium war nicht nur mit seinen Forschungsaktivitäten beschäftigt. Es hat 2021 gleich drei Themenworkshops zu UV-LEDs in verschiedenen Anwendungsbereichen durchgeführt. Die Veranstaltungen fanden coronabedingt online statt und waren mit jeweils 60 bis 80 Teilnehmenden gut besucht. Sie konnten nicht nur wichtige Erkenntnisse gewinnen, wie Corona-Viren wirksam bekämpft werden können, es wurden auch neue Kooperationen auf den Weg gebracht.

Mit der ICULTA 2021 – der "International Conference on UV LED Technologies & Applications" – bot das Konsortium in Zusammenarbeit mit der International UV Association (IUVA) der Community zum zweiten Mal ein Forum für den fachlichen Austausch. Die Konferenz brachte die weltweit führenden LED-Hersteller, -Anwender und -Forscher zusammen. Auch diese Veranstaltung musste virtuell durchgeführt werden, was dem regen Interesse der 320 Teilnehmenden aus 33 Ländern keinen Abbruch tat. Stark nachgefragt war insbesondere die Rolle von UV-LEDs bei der Bekämpfung von COVID-19, insbesondere bei der Desinfektion von Luft und Oberflächen.

What comes after coal? iCampus – innovations for structural change in Lusatia



Probe of the Raman system during measurements in the field.
Optode des Raman-Messsystems bei Messungen im Feld.

In 2019, the Innovation Campus Electronics and Microsensors Cottbus (iCampus) was launched at BTU Cottbus-Senftenberg. Four non-university research institutions are pooling their expertise with that of the BTU in the BMBF-funded iCampus and have been cooperating with Thiem Research GmbH (TRS) in Cottbus since 2022. The non-profit research company TRS develops, tests and integrates medical technology into regular clinical operations. The synergies in this alliance are intended to create an innovative, sustainable technology cluster that will support structural change in Lusatia. In 2022, the second implementation phase, funded by the BMBF with 20 million Euros, will be launched, in which previous results will be further developed for commercial exploitation. FBH is involved in two thematic fields, the μ -spectrum application laboratory and radar sensor technology.

Application laboratory μ -spectrum

FBH contributes its comprehensive know-how in narrowband and spectrally tunable laser sources. Together with the in-house Prototype Engineering Lab, our scientists integrate these sources into compact, mobile laser systems for Raman spectroscopy. Portable demonstrator systems with integrated spectrometers have already been successfully used several times for on-site measurements on fruit, on agricultural soils and in the medical environment.

Led by FBH, the μ -spectrum application laboratory is currently being established in Cottbus as part of the project. Novel spectroscopic measurement systems for future real-world measurement systems are to be developed there. The main focus at FBH is a spectrometerless resonance Raman system, which is

being developed in collaboration with Fraunhofer IPMS. For this purpose, we have simplified the previous measurement principle over the last two years. The patented method is based on a spectrally tunable diode laser that can be switched quickly between two wavelengths and can be used without a spectrometer. Like a fingerprint, each substance has an individual spectrum that can be detected with the method, and the concentration of the substance can be determined. In this process, the Raman signal of the sample is captured by an integrated detector via a filter element. This makes the measuring system more cost-effective and even more compact. The miniaturized overall system that has been constructed in this way is intended to replace complex and costly spectrometers in selected application fields in the future.

Further development aimed at the medical sector

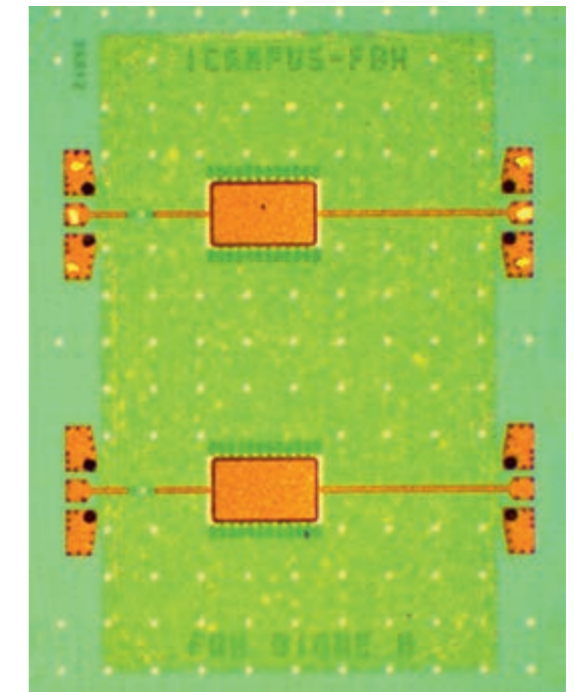
In a first step, the measurement concept will be used specifically for carotenoids, which play a role in both plants and medicine. Further applications are in industrial process control, for example in the food industry and in the pharmaceutical sector.

In the medical field, FBH cooperates closely with TRS. We then jointly utilize the developed systems for a study in the clinic. In addition to new findings in therapy, this is also expected to open up new application options. Studies on other carotenoids (e.g. lycopene), sugars, starch, nitrates, sulfates, phosphates, and carbonates will expand the number of detectable substances.

Radar sensors

FBH is also involved in the development of a mobile and compact radar system for cardiovascular monitoring suitable for home use. The system is designed to contactlessly record the cardiac function of patients and automatically transmit this data to the supervising physician via a secure interface. Our work is focused on improving the calibration of the sensor data in order to increase the system dynamics. With the same objective, the radar detector is undergoing further technological development. Since the relevant signals are very weak compared to the ambient echoes and are also superimposed by patient movements, the dynamic range of the sensor is a critical system parameter that is essential for its function. Here, the sensor dynamics is limited by the distortions of the diode detectors at high input powers. Therefore, this non-linearity of the detectors was determined by calibration measurements and the baseband signal was digitally corrected accordingly. This method was successfully demonstrated on a six-port radar at 24 GHz.

In addition, the integration of GaN- and InP-based diode detectors was investigated, since these technologies allow higher power levels of the local oscillator than the Si-based diodes, which enables further degrees of freedom for the system dynamic range.



Chip photo of an InP detector diode fabricated using the FBH InP HBT process.
Chip-Foto einer InP-Detektor-Diode realisiert mit dem InP-HBT-Prozess des FBH.



Portable, spectrometerless Raman system for on-site measurements on selected substances.

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

werden kann. Dabei wird das Raman-Signal der Probe über ein Filterelement von einem integrierten Detektor erfasst. Das macht das Messsystem kostengünstiger und noch kompakter. Das damit aufgebaute miniaturisierte Gesamtsystem soll künftig komplexe und aufwändige Spektrometer in ausgewählten Anwendungsbereichen ersetzen.

Ausbau in Richtung Medizin

Das Messkonzept wird im ersten Schritt speziell bei Carotinoiden eingesetzt, die sowohl in Pflanzen als auch in der Medizin eine Rolle spielen. Weitere Anwendungen liegen in der industriellen Prozesskontrolle, etwa bei Lebensmitteln und im Bereich der Pharmazie.

Im medizinischen Bereich kooperiert das FBH eng mit der TRS. Die entwickelten Systeme setzen wir dann gemeinsam in der Klinik für eine Studie ein. Neben neuen Erkenntnissen in der Therapie sollen so auch neue Anwendungsmöglichkeiten erschlossen werden. Untersuchungen zu weiteren Carotinoiden (z.B. Lycopin), Zucker, Stärke, Nitrate, Sulfate, Phosphate und Carbonate sollen zudem die Zahl der nachweisbaren Substanzen erweitern.

Radarsensoren

Das FBH ist zudem an der Entwicklung eines mobilen und kompakten Radarsystems zum Herzkreislauf-Monitoring für den Heimbereich beteiligt. Das System soll berührungslos die Herz-Funktion von Patientinnen und Patienten erfassen und diese Daten automatisiert über eine gesicherte Schnittstelle an den betreuenden Arzt übermitteln. Wir arbeiten zum einen an einer verbesserten Kalibrierung der Sensordaten, um die Systemdynamik zu erhöhen. Mit der gleichen Zielsetzung wird der Radardetektor technologisch weiterentwickelt. Da die relevanten Signale im Vergleich zu den Echos der Umgebung sehr schwach sind und zudem von Bewegungen der Patienten überlagert werden, ist die Dynamik des Sensors ein kritischer und für die Funktion essentieller Systemparameter. Die Sensordynamik ist dabei durch die Verzerrungen der verwendeten Diodendetektoren bei hohen Eingangsleistungen begrenzt. Daher wurde diese Nicht-Linearität der Detektoren mit Kalibriermessungen bestimmt und das Basisbandsignal entsprechend digital korrigiert. Diese Methode wurde erfolgreich an einem Sechs-Tor-Radar bei 24 GHz demonstriert.

Zusätzlich wurde die Integration von GaN- und InP-basierten Diodendetektoren untersucht, da mit diesen Technologien höhere Leistungspegel des Lokaloszillators möglich sind, was weitere Freiheitsgrade für die Systemdynamik schafft.

Was kommt nach der Kohle? iCampus – Innovationen für den Strukturwandel in der Lausitz

2019 ist der Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus (iCampus) an der BTU Cottbus-Senftenberg gestartet. Im BMBF-geförderten iCampus bündeln vier außeruniversitäre Forschungseinrichtungen ihre Kompetenzen mit denen der BTU und kooperieren seit 2022 mit der Thiem Research GmbH (TRS) in Cottbus. Die gemeinnützige Forschungsgesellschaft TRS entwickelt, erprobt und integriert Medizintechnik in den klinischen Regelbetrieb. Durch die Synergien im Verbund soll ein innovativer, nachhaltiger Technologiecluster aufgebaut werden, der den Strukturwandel in der Lausitz unterstützt. 2022 ist die zweite, vom BMBF mit 20 Millionen Euro geförderte Umsetzungsphase gestartet, in der die bisherigen Ergebnisse für die wirtschaftliche Verwertung weiterentwi-

ckelt werden. Das FBH ist in zwei Themenfelder eingebunden, das Applikationslabor μ -Spektrum und die Radarsensoren.

Applikationslabor μ -Spektrum

Das FBH bringt sein umfassendes Know-how bei schmalbandigen und spektral durchstimmbaren Laserquellen ein. Diese integrieren unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gemeinsam mit dem hauseigenen Entwicklungszentrum in kompakte, mobil einsetzbare Lasersysteme für die Raman-Spektroskopie. So wurden transportable Demonstratorsysteme mit integrierten Spektrometern bereits mehrfach erfolgreich für Vor-Ort-Messungen an Obst, auf Ackerböden und im medizinischen Umfeld eingesetzt.

Unter Leitung des FBH entsteht im Rahmen des Projektes in Cottbus aktuell das Applikationslabor μ -Spektrum. Dort sollen neuartige spektroskopische Messsysteme für zukünftige Real-World-Messsysteme entwickelt werden. Schwerpunkt am FBH ist ein spektrometerloses Resonanz-Raman-System, das in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPMS entsteht. Dazu haben wir in den letzten beiden Jahren das bisherige Messprinzip vereinfacht. Das patentierte Verfahren basiert auf einem schnell zwischen zwei Wellenlängen umschaltbaren, spektral durchstimmbaren Diodenlaser und kann ohne Spektrometer genutzt werden. Wie ein Fingerabdruck hat jeder Stoff ein individuelles Spektrum, das mit dem Verfahren nachgewiesen und die Konzentration des Stoffes bestimmt



📍 CNC lathe for precision turned parts of various materials.
CNC-Drehmaschine für Präzisionsdrehteile verschiedener Materialien.

Opening up new possibilities – high-tech in the fine mechanics workshop

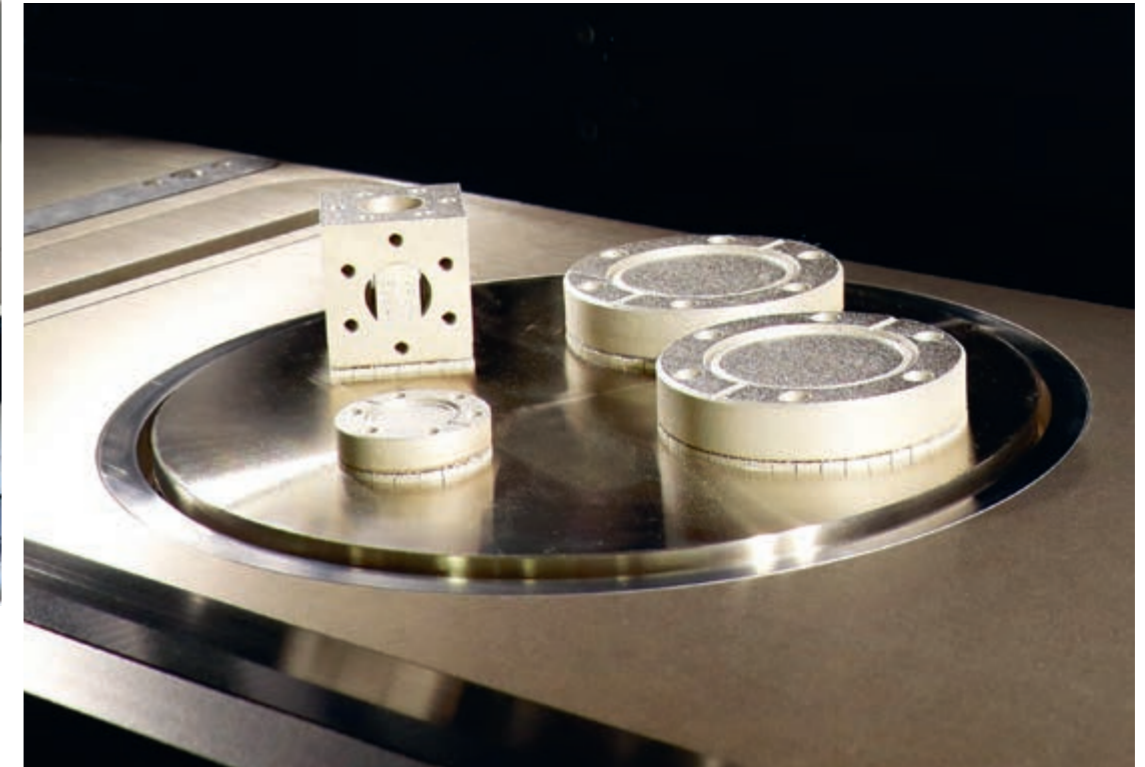
In June 2020, our fine mechanics workshop moved to larger premises. We have simultaneously invested in the latest technologies and state-of-the-art machinery now covering an area of 190 m². The advanced equipment opens up many new possibilities for manufacturing high-precision components for research and prototype production. They are operated by a dedicated and highly qualified team, including two Bachelor Professionals of Metal Production and Management, a Bachelor of Mechanical Engineering, and an Industrial Mechanic specialized in precision engineering. The fine mechanics workshop is an integral part of the Prototype Engineering Lab at FBH, which manufactures customized solutions – from measurement fixtures to prototypes – and thus bridges the gap between research and industry.

Customizable metal structures using 3D printing

Additive manufacturing is shaping the future of industrial manufacturing. Using metal powder and a laser, completely new, innovative components can be created in the workshop. Powder bed laser metal fusion can produce almost any geometric shape, integrated cooling channels, lattice structures, and much more. Whether copper cooling units, aluminum housings, stainless steel vacuum chambers or extremely rigid titanium components, almost anything can be printed with this system.

State-of-the-art equipment for intricate workpieces

Our new 5-axis milling machine has – in addition to three conventional linear motion axes – two more rotary axes. This allows the tool to move freely in space. Very precise and complex workpieces can thus be produced from a wide variety of materials in just one step.



📍 Workpieces from the 3D metal printer at FBH.
Werkstücke aus dem 3D-Metalldrucker am FBH.

Our multi-purpose wire Electrical Discharge Machine (EDM) is also suitable for the fabrication of complex and filigree components. With it, we can cut all conductive materials with any level of hardness without physical contact between the tool and the workpiece. The thin brass wire can cut even very thick material up to 200 mm effortlessly, with precision and accuracy to the thousandth of a millimeter.

Precise drillings with a diameter of 0.1 mm up to 3 mm are produced with our hole drilling EDM. The maximum drilling depth of 200 mm is much greater compared to conventional drilling tools. With it, all conductive materials, with any hardness, can be drilled without mechanical impact.

➤ *Powder bed laser metal fusion can produce almost any geometric shape, integrated cooling channels, lattice structures, and much more.*



5-axis milling machine for precise and complex components.
5-Achs-Fräsmaschine für präzise und komplexe Bauteile.

Eröffnet neue Möglichkeiten – Hightech in der Feinwerkstatt

Im Juni 2020 ist unsere feinmechanische Werkstatt in eine größere Halle umgezogen. Zugleich haben wir auf den nun 190m² in neueste Technologien und Maschinen investiert. Die leistungsfähigen Anlagen eröffnen viele neue Möglichkeiten, um Präzisionsbauteile für den Forschungsbetrieb und die Prototypenfertigung herzustellen. Betrieben werden sie von einem engagierten und hochqualifizierten Team, zu dem ein Industriemeister und eine Industriemeisterin Metall, ein Bachelor of Mechanical Engineering und ein Industriemechaniker mit Schwerpunkt Feingerätebau gehören. Die Feinwerkstatt ist integraler Teil des Entwicklungszentrums am FBH, das maßgeschneiderte Lösungen fertigt – von der Messhalterung bis hin zu Prototypen – und so die Brücke zwischen Forschung und Industrie schlägt.

Flexible Strukturen aus Metall mittels 3D-Druck

Die additive Fertigung prägt die Zukunft der industriellen Fertigung. Aus Metallpulver und Licht entstehen in der Werkstatt völlig neue, innovative Bauteile. Durch das pulverbettbasierte Laserschmelzen können fast alle Formen, integrierte Kühlkanäle, Gitterstrukturen und vieles mehr hergestellt werden. Ob Kupferkühler, Aluminiumgehäuse, Edelstahl-Vakuumkammern oder hochfeste Titanbauteile, damit kann fast alles gedruckt werden.

Exzellente Ausstattung für komplexe und filigrane Bauteile

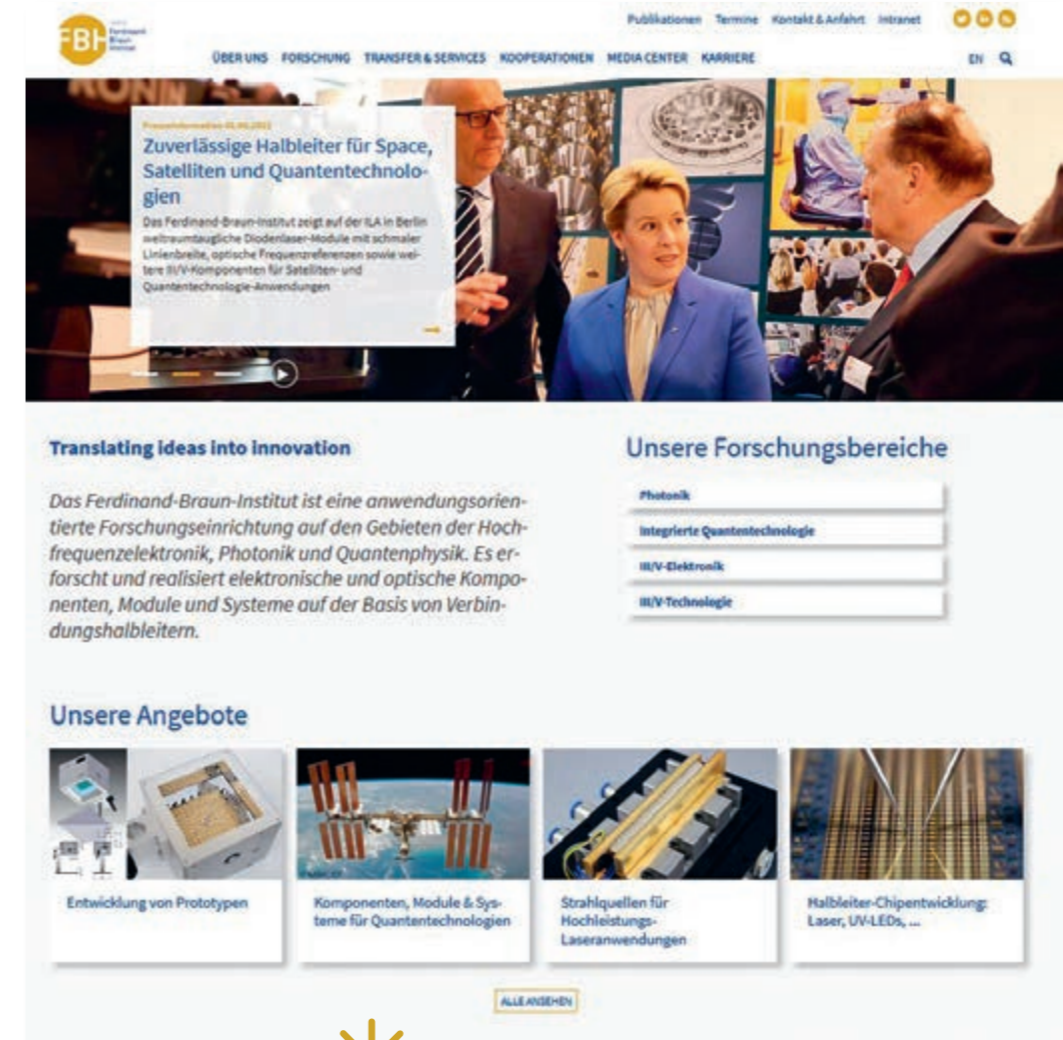
Unsere neue 5-Achs-Fräsmaschine verfügt – zusätzlich zu drei herkömmlichen linearen Bewegungsachsen – über zwei weitere Rotationsachsen. Dadurch kann sich das Werkzeug frei im Raum bewegen. Aus den unterschiedlichsten Materialien entstehen dann sehr präzise und komplexe Bauteile in nur einer einzigen Aufspannung.

Für komplexe und filigrane Bauteile eignet sich auch unsere Drahterodiermaschine. Damit können wir alle leitfähigen Materialien beliebiger Härte ohne mechanische Einwirkung bis auf den Tausendstel Millimeter genau bearbeiten. Ein dünner Messingdraht schneidet problemlos, mit höchster Präzision und Formgenauigkeit auch sehr dickes Material bis 200 mm.

Präzise Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,1 mm bis zu 3 mm stellen wir mit unserer Bohrerodiermaschine her. Die maximale Bohrtiefe von 200 mm ist im Vergleich zu herkömmlichen Bohrwerkzeugen wesentlich größer. Damit lassen sich alle leitfähigen Materialien, mit beliebiger Härte, ohne mechanische Einwirkung bohren.

Relaunch of the FBH website

In October, the new website of the Ferdinand-Braun-Institut was launched. With newly structured content and a fresh look, our offers for customers and partners are even more in focus – it's best to click in yourself: www.fbh-berlin.de/en



www.fbh-berlin.de



Relaunch der FBH-Website

Im Oktober ist die neue Website des Ferdinand-Braun-Instituts online gegangen. Mit neu strukturierten Inhalten und frischem Look stehen unsere Angebote für Kunden und Partner noch stärker in Fokus – am besten selber reinklicken: www.fbh-berlin.de

Photonics Photonik

Within our photonics research area, we cover a broad range of diode laser and light-emitting diode (LED) developments that are tailored precisely to fit individual requirements. The portfolio ranges from research 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:

- > **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** – optics for beam shaping, external resonators, electronics and crystals for frequency doubling are integrated into the miniaturized laser modules. Even subsequent coupling into glass fibers is possible. These light sources are ideally suited for applications including display and medical technology.
- > **Laser sensors** – diode lasers that are 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.

- > **GaN optoelectronics** – we develop diode lasers for the violet and UV LEDs especially for the UVB and UVC spectral range. Applications eligible for LEDs include disinfection and plant irradiation.
- Our Optoelectronics Department provides the required basic know-how for these developments: It designs, realizes and characterizes the corresponding diode lasers.

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:

- > **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-Optoelektronik** – auf diesem Gebiet entwickeln wir Diodenlaser und UV-Leuchtdioden insbesondere für den UVB- und UVC-Spektralbereich. Die LEDs eignen sich u. a. für die Desinfektion und die Pflanzenbestrahlung.

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

Improved laser facet stability by ultra-high vacuum cleaving

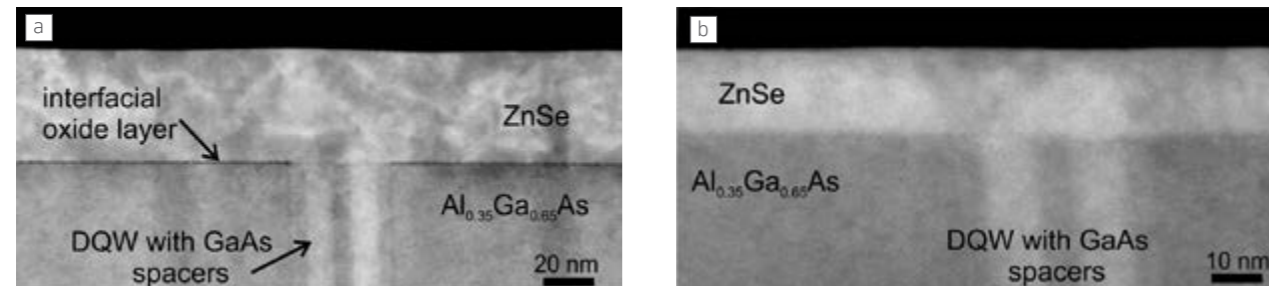


Fig. 1. High annular dark field STEM images of passivated facets in the quantum well region fabricated by hydrogen cleaning (a) and cleaving in vacuum (b).

GaAs-based laser diodes are among the most energy efficient light sources currently available. Therefore, they have a wide application spectrum, ranging from material processing to sensing applications. Future space-based applications require ridge-waveguide lasers (RWLs) and amplifiers with a very high output power and a simultaneously high reliability. These requirements cannot be met using the long-proven laser facet passivation process employed at FBH [1], [2]. This patented method relies on the removal of the native oxide from the laser facet by means of atomic hydrogen cleaning and subsequent passivation of the laser facet by ZnSe. However, it is not possible to remove the complete surface oxide from the (Al,Ga)As layers of the laser diode using this method. The presence of this oxide layer can be clearly seen as a dark line in cross-sectional scanning transmission electron microscopy (STEM) images of the laser facet of a passivated RWL, see Fig. 1a. It's likely that the presence of this oxide limits the reliability of the laser diodes. Facets without the native oxide are therefore desirable.

Cleaving laser bars in ultra-high vacuum (UHV) prevents laser facets from oxidation and makes it possible to realize entirely oxide-free ZnSe passivated facets. To improve the reliability of edge-emitting lasers, FBH acquired a system capable of UHV cleaving and ZnSe passivation in 2020. The STEM image of a laser facet passivated with this new system is shown in Fig. 1b. It is easy to observe that no oxide is present between (Al,Ga)As and

ZnSe, because no dark line shows. This illustrates that the facet passivation with this new approach works as expected.

We investigated the potential of the new passivation method on device reliability using 980 nm and 1064 nm RWLs, see Fig. 2. The output power of the RWLs was increased step-by-step up to the maximum output power (limited by thermal rollover). For the 980 nm RWLs, we observed excellent results for both types of passivation methods. For the RWLs fabricated by UHV cleaving, the aging was stopped after 2,000 hours due to time limitations. Within this timeframe, a single failure unrelated to the facet occurred. By contrast, the 1064 nm RWLs obtained by hydrogen cleaning have only limited reliability, failing at an output power of 0.4 W. The RWLs fabricated by UHV cleaving, on the other hand, didn't show any sign of facet degradation (again a single RWL died from an internal defect) and reached output powers of 1.4 W [3].

These results demonstrate a significantly higher stability of laser facets by using UHV cleaving compared to hydrogen cleaning. This improvement is a key enabler for qualifying lasers and amplifiers for future space-based applications. Based on these results, similar improvements are expected for lasers operating at other wavelengths as well as for broad area lasers.



FBH's novel UHV cleaving and passivation system.

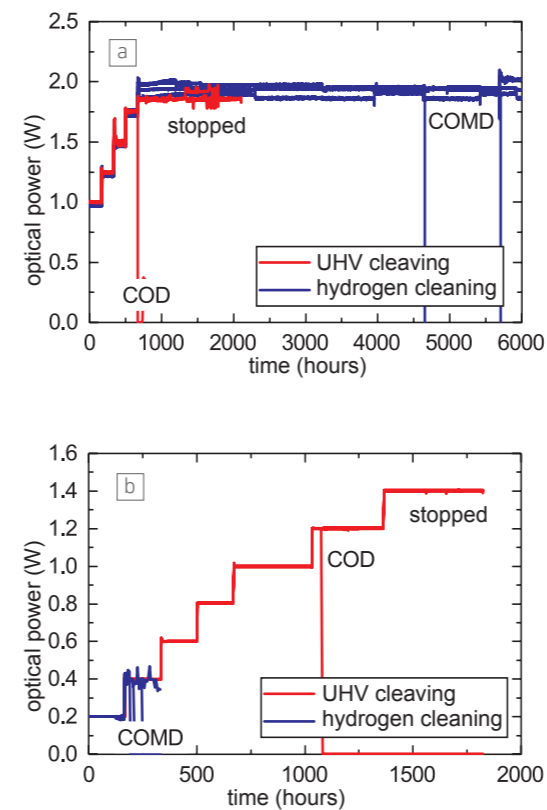


Fig. 2. Lifetime tests for two types of RWLs investigated (a) 980 nm RWLs, (b) 1064 nm RWLs.

Kantenemittierende Laserdioden auf GaAs-Basis gehören zu den derzeit effizientesten Lichtquellen und werden vielfältig eingesetzt. Weltraumanwendungen stellen dabei besonders hohe Anforderungen an die Ausgangsleistung und Zuverlässigkeit der Laserdioden. Daher hat das FBH 2020 seine etablierte Facettentechnologie um eine Anlage zum Spalten und Versiegeln der Laserriegel im Ultrahochvakuum erweitert. Damit lässt sich eine Oxidschicht an der AlGaAs-ZnSe-Grenzfläche vermeiden, wodurch sich die Facettenstabilität verbessert.

Lebensdauermessungen an 980 nm und 1064 nm Rippenwellenleiterlasern zeigten, dass das Vakuumspalten die Lebensdauer von 1064 nm Rippenwellenleiterlasern substantziell verbessert. Das Verfahren ermöglicht daher die Qualifikation von Rippenwellenleiterlasern und Verstärkern für zukünftige Weltraumanwendungen. Auch für andere Wellenlängen oder Breitstreifenemitter ist eine verbesserte Facettenstabilität zu erwarten.

Publications

[1] P. Ressel, G. Ebert, U. Zeimer, K. Häusler, G. Beister, B. Sumpf, A. Klehr, G. Tränkle, "Novel passivation process for the mirror facets of Al-free active-region high-power semiconductor diode lasers", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 17, no. 5, pp. 962-964, doi: 10.1109/LPT.2005.846750 (2005).

[2] P. Ressel, G. Ebert, "Method for the passivation of the mirror-type surfaces of optical semiconductor elements", US7338821B2 (2008).

[3] J. E. Boschker, U. Spengler, P. Ressel, M. Schmidbauer, A. Mogilatenko, A. Knigge, "Stability of ZnSe-passivated laser facets cleaved in air and in ultra-high vacuum", IEEE Photonics Journal, doi: 10.1109/JPHOT.2022.3176675 (2022).

Wavelength-stabilized diode lasers with epitaxially-stacked multiple active regions and tunnel junctions for LiDAR applications

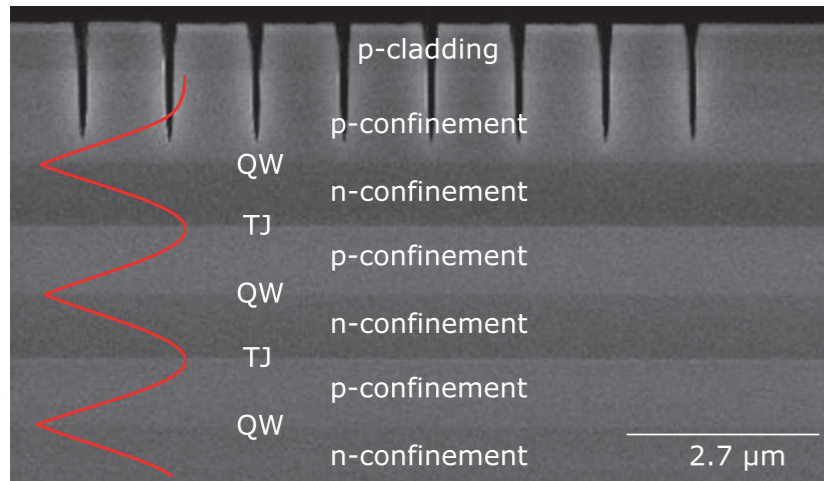


Fig. 1. SEM picture of the DBR laser with active quantum wells (QWs), tunnel junctions (TJs) and surface grating with superimposed mode profile (red).

Lasers generating short optical pulses in the nanosecond range are key components for Light Detection and Ranging (LiDAR), free-space communication, spectroscopy, metrology, and material processing. In order to reduce the high electrical currents needed to achieve high optical peak powers, several laser diodes separated by tunnel junctions can be monolithically stacked in series. In the ideal case, the slope efficiencies of such nanostack lasers are proportional to the number N of diodes. Thus, far above threshold, the optical power is increased by a factor of N compared to a single diode at the same injection current. This is achieved at the expense of by a factor N increased voltage.

Instead of stacking individual laser diodes, it is also possible to epitaxially stack several active regions in the GaAs-based diode lasers, alternating with tunnel junctions in a single waveguide core. It is advantageous to utilize a higher order vertical mode, placing tunnel junctions and active regions into its nodes and antinodes, respectively. This minimizes the impact of the strong absorption, which results from the highly doped tunnel junctions and maximizes the modal gain. The concept enables to implement a surface Bragg grating for wavelength stabilization,

needed to improve the signal-to-noise ratio in LiDAR systems for autonomous driving.

For the very first time, we have successfully fabricated such a distributed Bragg reflector (DBR) laser at FBH utilizing two tunnel junctions and three active regions as shown in Fig. 1. The layer structure was grown by metalorganic vapor phase epitaxy on a GaAs substrate. Its active regions consist of compressively strained InGaAs single quantum wells (QWs). The tunnel junctions (TJs) are based on thin, extremely highly p- and n-doped GaAs layers forming a forward biased diode. Lasing of the 3rd vertical mode was confirmed by comparing measured and simulated vertical (fast-axis) far field profiles (Fig. 2). We then used e-beam lithography to define the grating of the DBR on parts of the surface of the completely grown wafer and transferred it into the semiconductor by plasma etching. The grating period of 970.7 nm, corresponding to a 7th Bragg order, was chosen for an intended Bragg wavelength of 905 nm. Fig. 3a shows the dependence of the emitted optical pulse power on the pulse current under injection of electrical nanosecond pulses. The laser has a p-contact stripe width of 50 μm , a cavity length of 6 mm, and a length of the DBR of 1 mm. An almost

Laser, die kurze optische Pulse im Nanosekundenbereich emittieren, sind Schlüsselkomponenten für zahlreiche Anwendungen. Dazu zählen unter anderem LiDAR, optische Freiraum-Kommunikation, Spektroskopie, Metrologie und Materialbearbeitung. Mit wellenlängenstabilisierten Multidiolenlasern hat das FBH neuartige Laserstacks mit mehreren Tunnel-dioden und aktiven Schichten in einem Wellenleiterkern prozessiert. Dabei ist es uns gelungen, sowohl die großen Stromstärken, die zum Erreichen hoher optischer Pulsleistungen notwendig sind, zu reduzieren als auch die Wellenlänge der

Laser durch ein Oberflächen-Bragg-Gitter zu stabilisieren. Letzteres verbessert das Signal-Rausch-Verhältnis in autonomen LiDAR-Systemen und erhöht damit deren Reichweite. Möglich wurde dies, indem wir drei aktive Schichten und zwei Tunnelübergänge in die Maxima bzw. Minima der 3. vertikalen Mode des gemeinsamen Wellenleiters platziert haben. Ein so hergestellter DBR-Laser emittierte im Nanosekundenbetrieb eine um fast den Faktor 3 höhere Leistung als ein Laser mit nur einer aktiven Schicht.

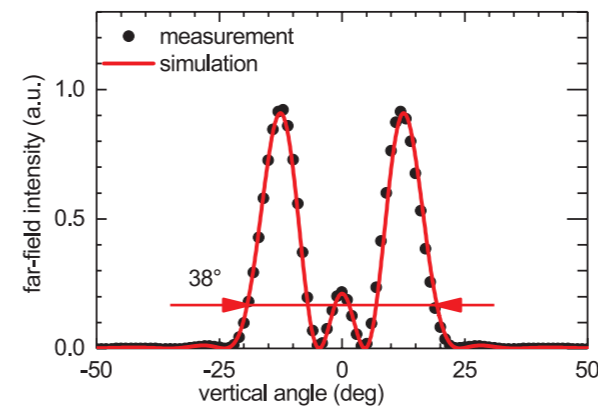


Fig. 2. Measured and simulated profile of the vertical far-field.

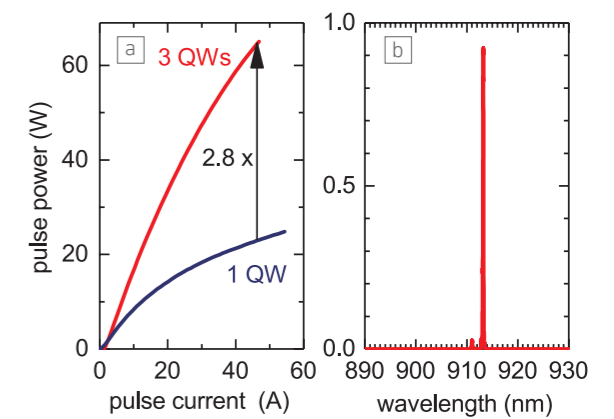


Fig. 3a) Optical power versus injection current (10 ns pulse length, 10 kHz repetition rate). b) Optical spectrum.

three-fold increase of the optical power compared to DBR lasers with a single active region was demonstrated. The narrow time-averaged optical spectrum with a peak wavelength near 910 nm reveals the effect of the 7th order surface Bragg grating (Fig. 3b).

To conclude, we have fabricated a GaAs-based distributed Bragg reflector laser with an enhanced slope efficiency. This was achieved by placing three active regions and two tunnel junctions into both antinodes and nodes of the third-order vertical mode of the common waveguide.

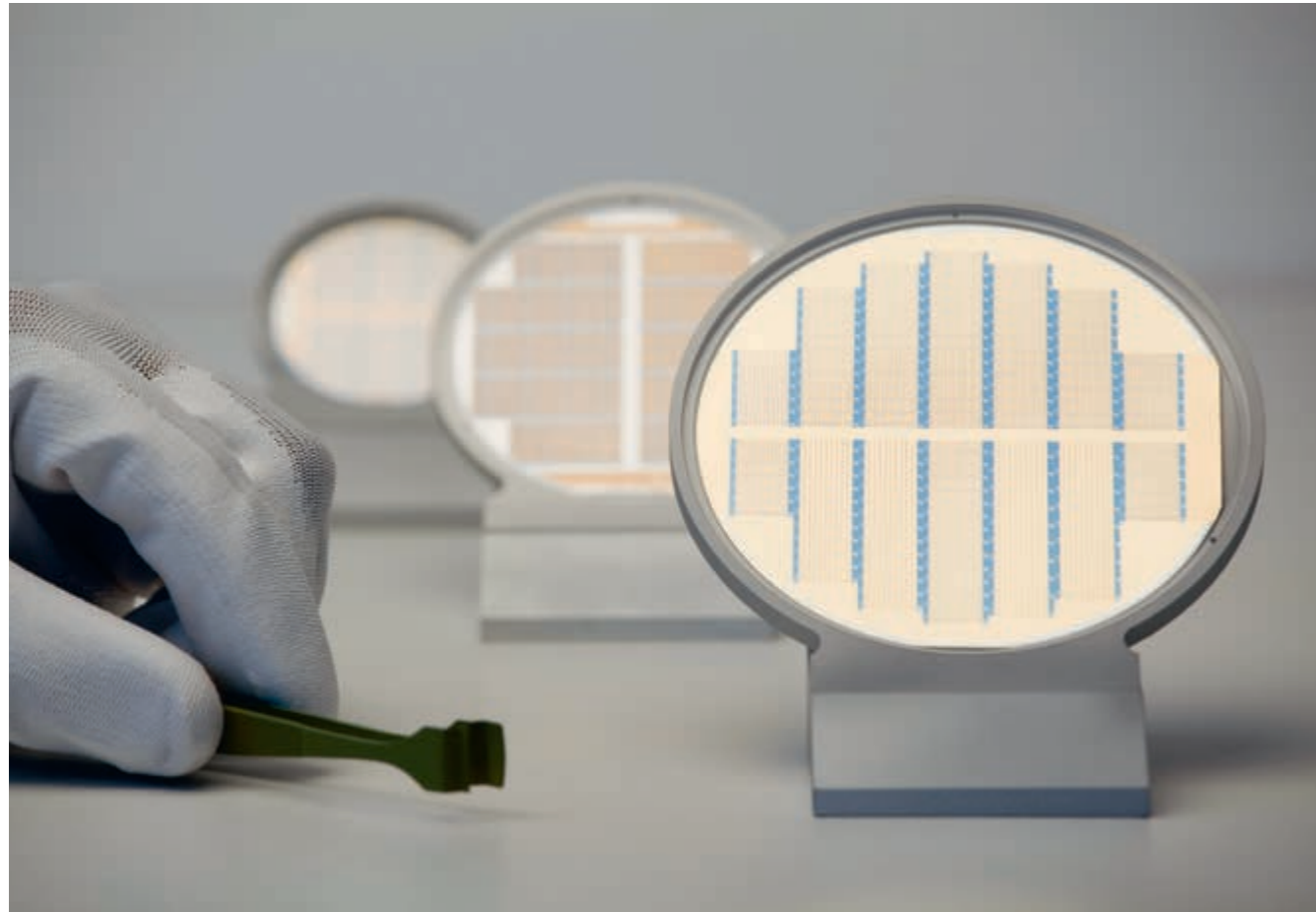
This work was supported by the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) under Ref. 16FMDQ2 and the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) grant 13N15566 as part of WiVoPro.

Publications

H. Wenzel, A. Maaßdorf, C. Zink, D. Martin, M. Weyers, A. Knigge, "Novel 900 nm diode lasers with epitaxially stacked multiple active regions and tunnel junctions", *Electron. Lett.* 57, 445-447 (2021).

H. Wenzel, J. Fricke, A. Maaßdorf, R. Staske, N. Ammouri, H. Christopher, C. Zink, D. Martin, M. Weyers, A. Knigge, "Internally wavelength stabilized GaAs-based diode lasers with epitaxially-stacked multiple active regions and tunnel junctions for LiDAR applications", *IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, Potsdam (2021).

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).



➤ Spatially resolved strain calculation for GaAs devices is essential to achieve further improvements.

Effective temperature method to predict stress in optical GaAs devices

Microscopic optical amplifiers and lasers are under the influence of numerous internal and external stress factors. They are responsible for both positive and negative effects on the overall device performance. We have therefore implemented an 'effective temperature' simulation method, which allows us to predict the optical behavior of stressed devices. Stress, however, comes in different shapes and magnitudes. While epitaxial layers under tension are used to tune the emission wavelength, the thermal expansion of laser submounts has to be matched in their coefficient to the laser itself. An excess of internal or external stress can even destroy the overall device. However, while stress loads of minor excess are not capable of harming the laser or amplifier, they are able to change their optical behavior. This is especially true for designs with weak included waveguides or no intended waveguiding at all. Even a metallization sputtered to the surface of the device is capable of imprinting a stress pattern that changes the overall device behavior.

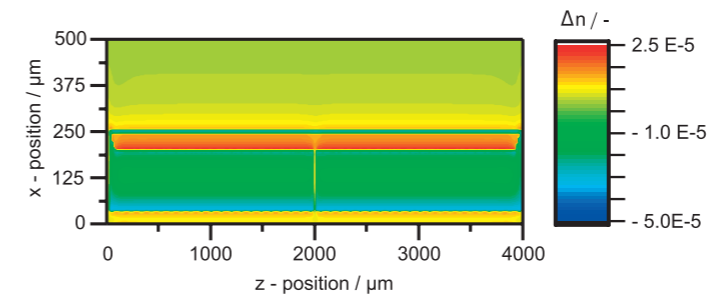
As a result, the beam quality or optical power can be strongly deteriorated. Sputtered metallization is used in most edge-emitting devices for electrical current transportation. Therefore, it is of high importance to understand the introduced stress pattern by metallization layers onto the devices.

However, the experimental analysis of stress within microscopic devices is complicated and requires specific optical setups. Additionally, it is hardly possible to obtain a spatially resolved stress state of the device. To overcome this issue, we derived a physical simulation model that allows time efficient and spatially resolved stress determinations. It is based on a simple transmission measurement which enables to calibrate the simulation.

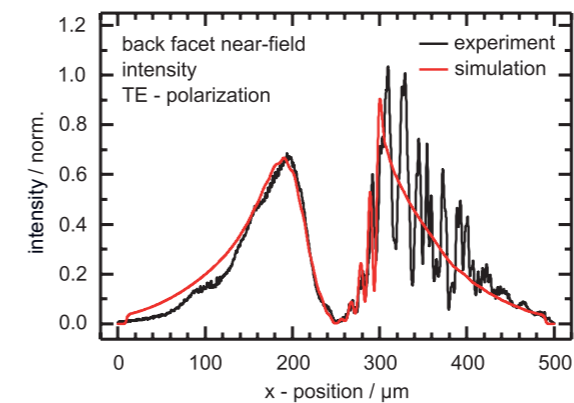
The simulation itself is carried out using standard software tools. In a first step, the investigated metallization layout on top of the device is analyzed by a finite element method software.



➤ Fig. 1. Top view on a GaAs device including PIC enabling metallization.



➤ Fig. 2. False color map of a refractive index change caused by metallization.



➤ Fig. 3. Comparison between experimentally derived data and simulation.

An exemplary metallization is shown in Fig. 1. We introduced a fictive temperature (effective temperature) difference between metallization and semiconductor material. Due to thermal expansion, normal and shear stress effects are the result. The resulting strain from the introduced stress is calculated within the semiconductor material, which finally changes the refractive index. This is a result of the elasto-optical effect, which is shown in Fig. 2.

The simulation is calibrated by running a simple optical simulation, which reenacts the experimental transmission measurement. For the simulation, the light is transmitted through the refractive index map calculated from the stress state. The emerging light intensity profile is now compared to the measurement by calculating the profile overlap. Finally, the overlap is maximized by adapting the effective temperature of the metal-

ization. The result is displayed in Fig. 3. With the effective temperature for the given metallization-semiconductor, the behavior of arbitrary metallization layouts can now be calculated. This result is highly important to help designing future device especially when featuring weakly waveguiding devices.

Basierend auf einer Transmissionsmessung in einem Referenz-Bauteil haben wir eine mechanisch-optische Simulation mithilfe experimenteller Werte kalibriert. Als variablen Parameter verwenden wir die sogenannte effektive Temperatur, die einen fiktiven Temperaturunterschied zwischen Oberflächenbeschichtung und Chip darstellt. Die daraus resultierende Verspannung des Chips generiert lokal unterschiedliche Brechzahländerungen. Sobald die effektive Temperatur für ein Materialsystem bestimmt ist, kann der Einfluss beliebiger Metall-Strukturierungen auf das optische Verhalten vorhergesagt werden.

Publication

P. Hildenstein, D. Feise, I. Ostermay, K. Paschke, G. Tränkle, "Precise prediction of optical behaviour of mechanically stressed edge emitting GaAs devices", *Optical and Quantum Electronics*, accepted for publication (2022).

Extreme vertical asymmetry for wide-ranging improvements in power and efficiency in broad area lasers



Single stack element as part of a high-power pump laser module.

High-power, efficient diode lasers are crucial elements in direct diode as well as in diode-pumped laser systems that are used for many advanced applications, e.g. material processing. Fabry-Perot cavity-based broad area (BA) lasers, realized using nearly-symmetric (around the quantum well) epitaxial layer designs deliver high power P_{opt} and high peak conversion efficiency η_E . However, even in well-optimized designs their peak P_{opt} is limited due to enhanced carrier loss into waveguide layers (WLs) at high bias that leads to a strong power saturation. The carrier losses also result in a rapid drop in η_E with increasing bias.

Researchers at FBH have developed an advanced epitaxial design concept employing a highly asymmetric layer structure (ETAS: extreme-triple-asymmetric, patented). This structure uses a much thinner p-doped WL than conventional symmetric epitaxy, and is finely tuned to ensure low loss, high gain and low resistance, as shown in Fig. 1. Overall, ETAS epitaxial designs allow much higher peak powers and higher conversion efficiency to be achieved in diode laser systems. A substantially higher η_E is also achieved at high operating power, demonstrated in earlier studies in 915 nm and 940 nm single emitters. In 2021, our team has successfully migrated ETAS designs into a range of other high-power device types, demonstrating around $\sim 1.5 \times$ higher power, corresponding to the highest reported powers in each case. Further improvements are expected as this design concept is developed.

Examples include grating-stabilized single emitters at 970 nm (for pumping Yb-doped fiber lasers), wide-aperture single emitters at 780 nm (for pumping Th:YAG crystals) and 1-cm bars at 940 nm (for pumping Yb:YAG disk lasers). The implementation of ETAS designs in monolithically grating-stabilized devices is especially challenging, due to the need to precisely and reproducibly introduce etched grating grooves into extremely thin epitaxial layers.

Specifically, ETAS BA lasers ($w = 200 \mu\text{m}$, $\lambda = 970 \text{ nm}$) with monolithic, surface-etched distributed Bragg reflectors (DBRs) yield $> 20 \text{ W}$ power in continuous-wave (CW) mode at $T_{HS} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

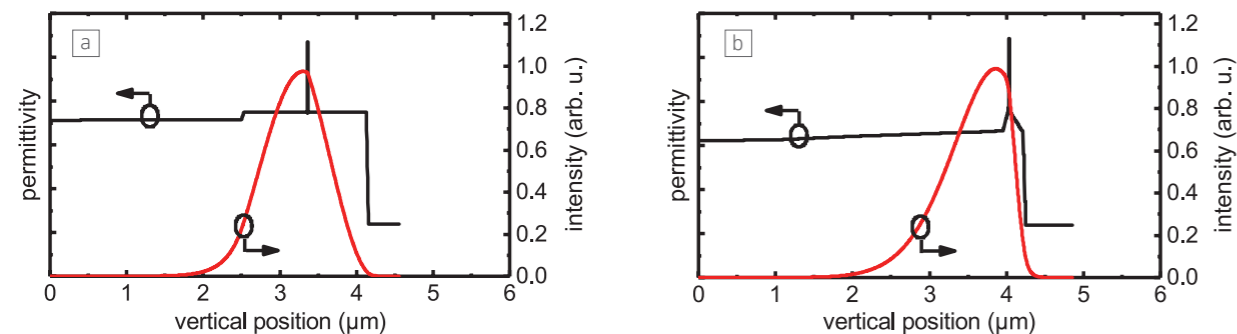


Fig. 1. (a) A conventional vertical epitaxial structure and (b) an innovative ETAS epitaxial layer design for higher powers.

heat-sink temperature, see Fig. 2a [1]. η_E is sustained at 60 % at $P_{opt} \sim 15 \text{ W}$. A stable emission with $\Delta\lambda_{95\%} < 1 \text{ nm}$ is maintained up to 20 W. Also, 780 nm ETAS BA lasers ($w = 1200 \mu\text{m}$), mounted within an expansion-matched copper-tungsten sandwich, deliver $P_{opt} > 210 \text{ W}$ in quasi-continuous wave (QCW, $\Delta\tau = 0.5 \text{ ms}$, $f = 10 \text{ Hz}$) mode at $T_{HS} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, see Fig. 2b [2]. Finally, 1-cm QCW ETAS laser bars ($\lambda \sim 940 \text{ nm}$, $\Delta\tau = 0.2 \text{ ms}$, $f = 10 \text{ Hz}$) mounted on a conductively cooled package provide a peak $P_{opt} \sim 2 \text{ kW}$ for a single-junction device, limited by the available current supply of 2 kA, at $T_{HS} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, see Fig. 2c [3].

Funding for the 780 nm development was provided by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the HECMIR project as part of the KMU-NetC program (FKZ – 03VNE2068E). High power bar development activities were supported by Trumpf GmbH.

Unsere Wissenschaftler*innen optimieren permanent die Designs GaAs-basierter Diodenlaser und untersuchen neue Ansätze, um die Ausgangsleistung der Laser weiter zu verbessern. Dabei hat sich gezeigt, dass die Implementierung von extrem dreifach asymmetrischen epitaktischen Schichtstrukturen (ETAS) besonders vorteilhaft ist. Mit ihnen lassen sich sowohl der Konversionswirkungsgrad wie auch die Ausgangsleistung steigern. Daher wurden in Voruntersuchungen derartige Strukturen zuerst in Breitstreifenlasern mit Emissionswellenlängen um 915 nm und 940 nm realisiert. Erst kürzlich konnten wir die Vorteile von ETAS-Designs in mehreren Diodenlaser-Typen der Höchstleistungsklasse demonstrieren. So haben wir die Leistungen bei diversen Breitstreifenlasern um das 1,5-Fache gesteigert. Monolithische, wellenlängen-stabilisierte Laser um 970 nm erreichten 22 W aus einer 200 μm Apertur. Laserdioden um 780 nm mit einer größeren Apertur von 1200 μm lieferten Ausgangsleistungen von 210 W. Bei Barren um 940 nm lag die Leistung bei 1,9 kW aus einer Apertur von insgesamt 9,2 mm. Damit erreichen unsere Diodenlaser jeweils internationale Bestwerte.

Publications

[1] P. Crump, M. J. Miah, J. Fricke, M. Wilkens, S. Kreuzmann, H. Wenzel, A. Knigge, "970 nm DBR broad-area semiconductor lasers with 60 % conversion efficiency", 27th Int. Semicond. Laser Conf. (ISLC), Potsdam, Germany, paper-WP3.6 (2021).

[2] S. Arslan, A. Maaßdorf, D. Martin, S. Kreuzmann, P. A. Crump, "Progress in high power diode laser pumps for high-energy class mid infra-red lasers", IEEE Photon. Conf. (IPC), Vancouver, Canada (2021).

[3] M. J. Miah, A. Boni, D. Martin, P. Della Casa, P. Crump, "Highly asymmetric epitaxial designs for increased power and efficiency in kW-class GaAs-based diode laser bars", 27th Int. Semicond. Laser Conf. (ISLC), Potsdam, Germany, paper-TuP2.1 (2021).

ETAS patent: US 10,840,674 B2; DE 10 2017 101 422 B4.

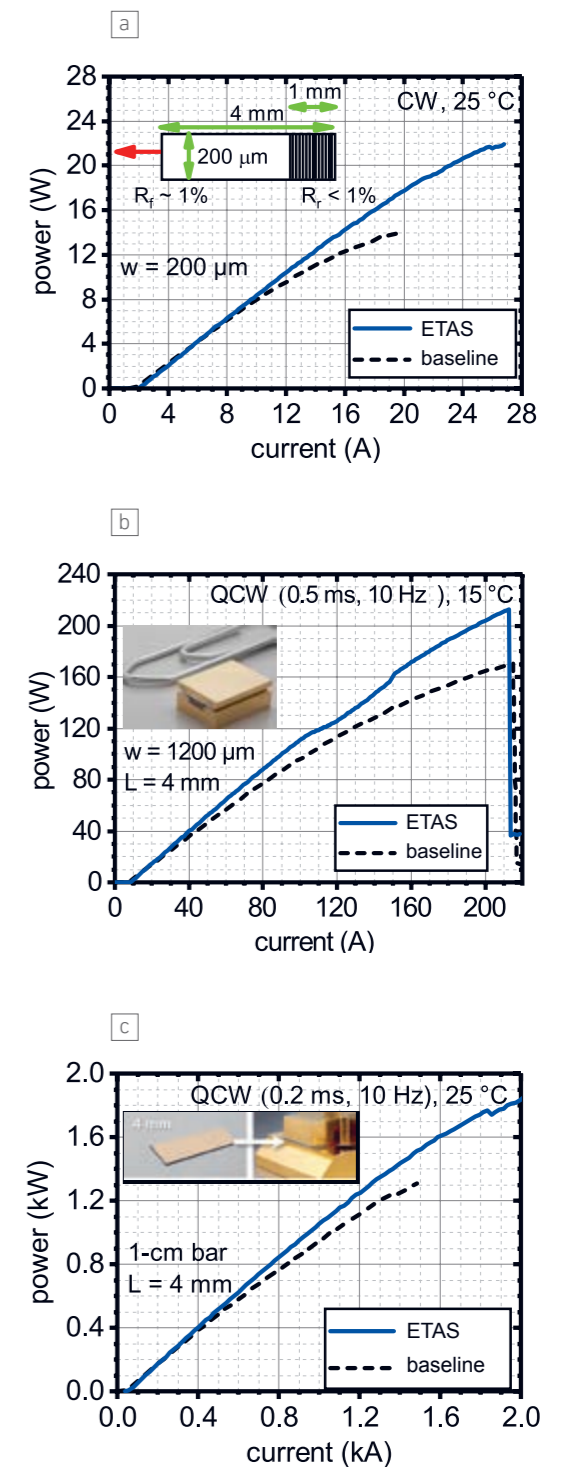


Fig. 2. Power-current characteristics of (a) 200 μm wide 970 nm DBR-stabilized BA lasers in CW mode at 25 $^\circ\text{C}$, (b) 1200 μm wide 780 nm BA lasers in QCW mode (0.5 ms, 10 Hz), and (c) 1-cm 940 nm laser bars in QCW mode (0.2 ms, 10 Hz, 25 $^\circ\text{C}$). Solid lines represent the ETAS devices, while dashed lines the corresponding baseline devices.

Scaling to support high-energy class lasers: higher power and high duty cycle in 780 nm diode laser pulsed pump modules

High-energy-class pulsed solid-state lasers provide high power and high brightness emission in a very short, highly energetic pulse. They are the subject of intense research, due to their potential to enable many new applications in extreme photonics. Examples span from studies in basic physics (wakefield particle acceleration) and material science, innovative engineering (shock peening) and medical treatments (cancer treatment, 3D x-ray scanning) through to power generation via laser-induced fusion.

For such challenging applications, solid-state lasers obviously need improved pump sources that provide light with the desired wavelength and power. Moreover, they have to deliver a sufficiently high pulse repetition rate for faster data collection and a high output power to yield higher performance and lower costs in €/W. FBH scientists have supported these developments for many years, by developing and delivering innovative diode laser pump modules to solid-state research groups. These modules are based on our highly efficient GaAs-based diode lasers and fully manufactured in-house at the FBH, spanning from

design to ready-for-shipment laser-fibered modules. In recent work, our team has developed custom pulsed pump modules that emit with a wavelength of 780 nm for pumping Tm:YAG crystals. These crystals provide gain in the mid-IR and are emerging as a critical gain material for future high-energy systems. Efficient, high-power large aperture diode lasers (1200 μm wide, with 6 mm resonator length) were developed that emit at 780 nm. As can be seen in Fig. 1, 24 of these lasers were integrated into innovative side-cooled stacks before being collimated. These stacks are designed for high-duty cycle (10...20%) quasi-continuous wave (QCW) operation, and each diode laser emits 60...70W optical in-pulse power at a pulse condition of 10 ms and 10 Hz. The long pump pulses can be efficiently absorbed by the Tm:YAG crystal, thus fully exploiting its long upper-state lifetime to generate highly energetic Joule-class pulses. Our team made rapid progress in 2021, developing both improved diode lasers and superior stacks. To date, the highest (peak) power per stack is approximately 1.6 kW at 70 A in a 10 ms pulse and repetition frequency of 10 Hz, see Fig. 2, based

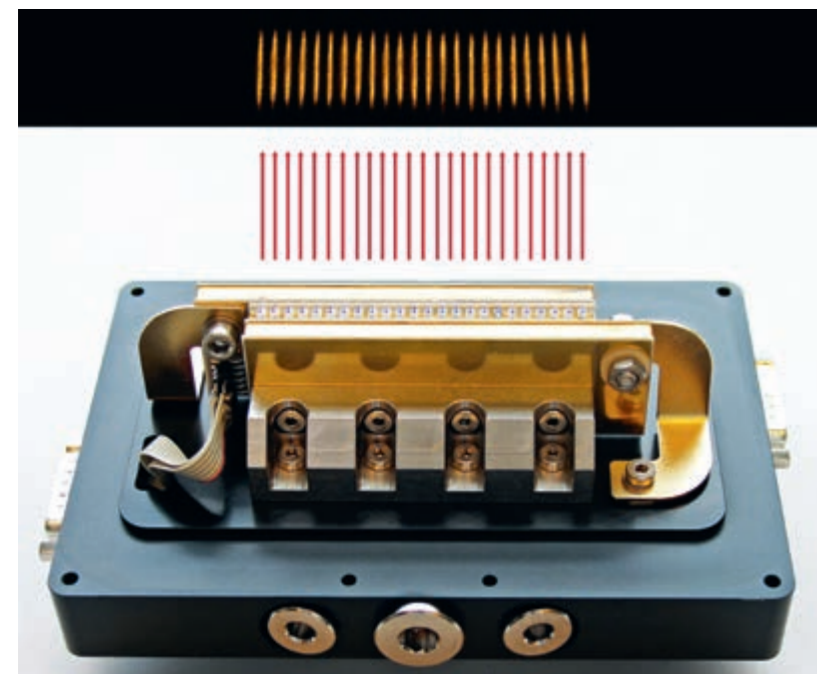


Fig. 1. Ready-for-shipment stack module (24 lasers, bottom) with false color image of a screen (top) on which the fully collimated single beams were guided on. Common slow axis collimation (SAC) not shown.

Publications

M. Hübner, M. Wilkens, B. Eppich, A. Maaßdorf, D. Martin, A. Ginolas, P. S. Basler, P. Crump, "A 1.4 kW 780 nm pulsed diode laser, high duty cycle, passively side-cooled pump module", Optics Express 29(7), 9749 (2021).

M. Hübner, M. Wilkens, A. Ginolas, B. Eppich, P. S. Basler, P. Crump, "Fiber coupling of a 1.4 kW diode laser stack module emitting near 780 nm as high duty-cycle pulsed pump source", HPLSE2021-2021-000048, Proc. of 4th International High Power Laser Science and Engineering Conference, Suzhou, China (2021).

M. Hübner, "Progress in high repetition rate diode laser pumps for future high-energy-class solid state laser systems", Talk, Photonics Days, Berlin, Germany (2021).

M. Hübner, M. Wilkens, B. Eppich, P. S. Basler, A. Maaßdorf, D. Martin, A. Knigge, A. Ginolas, S. Kreuzmann, P. Crump, "High-brightness 1.4 kW 780 nm QCW laser pump module with low-loss coupling into 1 mm fiber up to 50% duty cycle", Proc. Photonics West, doi: 10.1117/12.2608625 (2022).

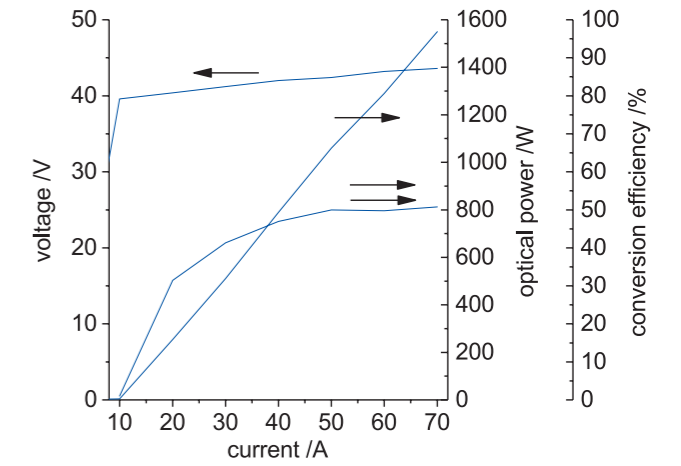


Fig. 2. Voltage, optical in-pulse power and conversion efficiency as a function of driving current for a stack module emitting near 780 nm. Taken at 10 ms and 10 Hz.

on the most recent diode lasers. The collimated beam has a narrow, symmetric (square) profile with a beam propagation ratio $M^2 < 300$.

Our team also showed that the side-cooled stack format allows scaling to higher duty cycles. This can be attributed to its low thermal impedance of ~ 11 mK/W with efficient heat removal and the long thermal time constant of 450 ms showing a slowly rising temperature. So, in recent work at the FBH, the stack module was operated with a pulse width of 10 ms at duty cycles of up to 50% and showed very little degradation of power and beam quality at higher duty cycles. In this work, we used lower power stacks built with earlier diode lasers, but also lasers with a design that is optimized for higher power were tested. In addition, the high beam quality allowed us to couple the stack module to a 1 mm core fiber, with a fiber coupling efficiency greater than 85% for all pulse regimes, see Fig. 3. Coupling into narrower core fibers ~ 700 μm for higher brightness beam delivery would be possible.

The results were achieved within the HECMIR project, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the KMU-NetC program (FKZ -03VNE2068E).

Festkörperlasersysteme der Höchstenergieklasse ermöglichen neuartige Anwendungen wie etwa Teilchenbeschleuniger – und ihre Bedeutung nimmt stetig zu. Das FBH entwickelt und fertigt innovative Diodenlaser-Pumpquellen, die die Nutzung von neuen Festkörpermateriale und neuen Betriebsmodi ermöglichen. In der aktuellen Forschung haben wir neue Pumpquellen mit einer Emissionswellenlänge um 780 nm entwickelt, die auf verbesserten Chip- und Stacktechnologien basieren. Sie werden bei Tm-dotierten YAG-Kristallen eingesetzt, um hochenergetische Pulse im mittleren Infrarot zu erzeugen. Durch Fortschritte bei den Diodenlasern konnten wir weiterentwickelte Stacks mit einer neuen Spitzenleistung um 1,6 kW mit 10 ms langen Pulsen und einer hohen Wiederholrate von 10 Hz demonstrieren. Dank der innovativen Bauform der Stacks konnten wir die Wiederholrate sogar bis auf 50 Hz (50% Tastverhältnis) steigern, wobei Leistung und Strahleigenschaften nur um < 10 % sanken. Erstmals wurde auch eine verlustarme Kopplung in eine Faser mit 1 mm Kern demonstriert.

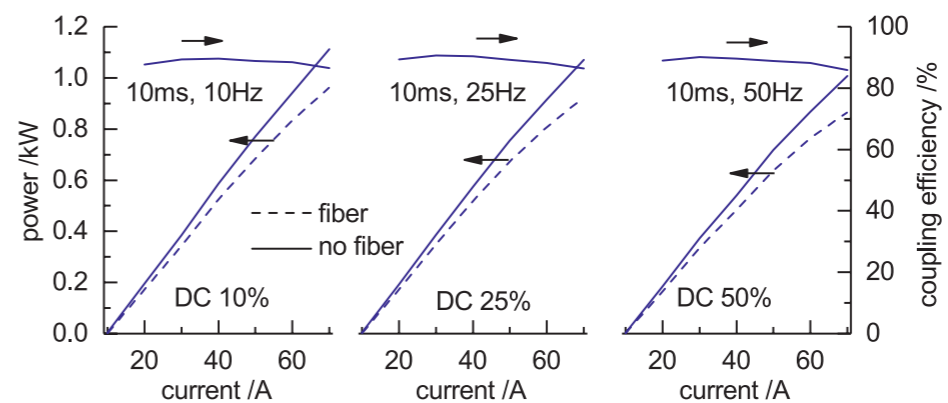


Fig. 3. Optical output power and coupling efficiency as a function of current from stack and coupled into a 1 mm core fiber (NA: 0.22) for duty cycles (DC) 10% (left), 25% (center) and 50% (right).

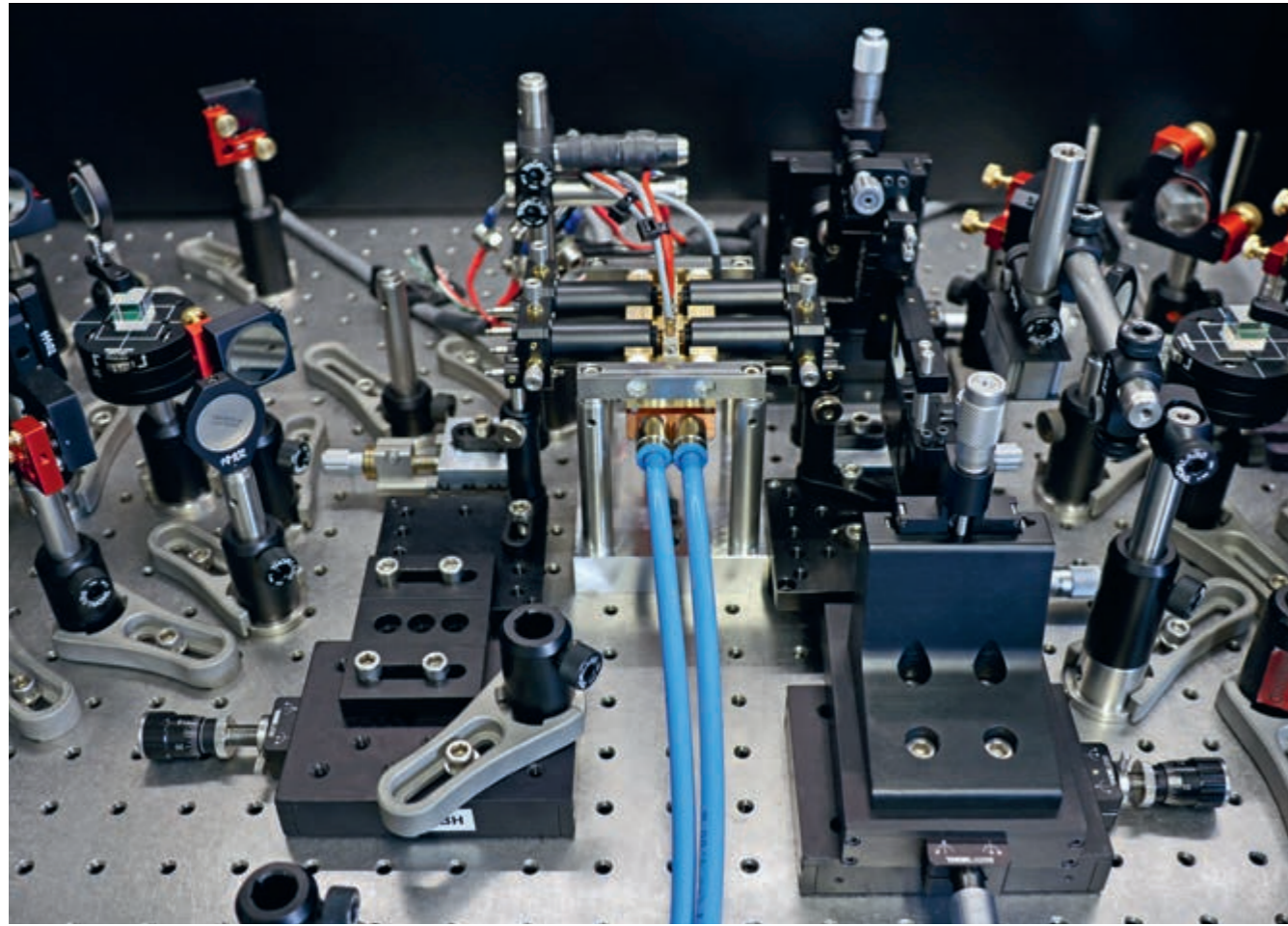


Fig. 1. Coherent beam combining (CBC) setup of two individual tapered optical amplifiers at 808 nm.

Coherent beam combining setup with diode laser and two individual tapered amplifiers at 808 nm

Diode lasers with high optical power and good beam quality are in high demand for many technological applications, including laser cutting and destruction of diseased cells. Their electro-optical efficiency, robustness and very small dimensions make them perfect candidates for applications with limited space, such as in a space station. However, single-mode diode lasers have power limitations of a few hundred milliwatts due to the risk of catastrophic optical mirror damage. The first step in overcoming this limitation is to use a tapered optical amplifier and create a master oscillator power amplifier. This allows the power to be increased to a few watts, but there is still a limit.

Coherent beam combining (CBC) is a very advantageous method that can overcome this power limitation. With it, two or more amplified laser beams can be coherently combined to produce a single beam with much higher optical power. At FBH, we have now successfully demonstrated a setup by coherently combining the radiations from two individual tapered amplifiers at 808 nm into one single beam [1]. The current through the ridge waveguide section of the tapered amplifier is used for phase stabilization. The phase locking process is automated by using a microcontroller and a reserved climbing hill algorithm.

With this setup, we achieved remarkable results at 808 nm: a high combining efficiency of over 80 % and a maximum combined optical power of $P_{CBC} = 3.5\text{W}$. This is a significant increase in optical power compared to a common single master oscillator power amplifier, which usually achieves a power around 2.4 W at these current levels (Fig. 3). Phase control was performed by tuning the current through the ridge waveguide section of one tapered amplifier to stabilize the relative phase difference between the amplified beams and keep the system phase-locked.

Implementing the ridge waveguide control and using it for phase tuning represents an important breakthrough in this field. It gives the opportunity to replace high-precision piezoelectric mirrors from a CBC setup, which have been commonly used for phase tuning. This does not only reduce the manufacturing cost of this kind of setup, but also gives us the ability to significantly reduce its dimensions. Another important advantage of replacing mechanical moving components is the improved stability of our system, which is necessary for high-quality laser systems. All these advantages will allow us to create new laser modules without the previous limitations. They open the way for much higher optical power levels. In addition, we can apply this technique to other wavelengths where the optical power levels are very limited.

We would like to thank Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry for supporting this project.

Viele technologische Anwendungen benötigen Diodenlaser mit hoher optischer Leistung bei gleichzeitig hoher Strahlqualität. Dazu gehört das Laserschneiden ebenso wie das Zerstören kranker Zellen in der Medizin. Diodenlaser punkten mit einer hohen elektrooptischen Effizienz, Robustheit sowie sehr geringen Abmessungen. Sie eignen sich daher ideal für Anwendungen, bei denen der verfügbare Platz begrenzt ist.

Am FBH haben wir kürzlich einen neuartigen Aufbau zur kohärenten Strahlkombination realisiert, der die Leistungsgrenze einzelner Diodenlaser durchbricht. Die deutlich höheren optischen Leistungen erzielen wir, indem wir zwei oder mehr verstärkte Laser kohärent kombinieren. Die Phase des Systems wird durch den Strom über die Rippenwellenleitersektion des Verstärkers gesteuert. Dabei wurden bemerkenswert hohe Kombinationseffizienzen von $> 80\%$ und eine optische Leistung von 3,5 W bei 808 nm bei niedrigen Betriebsströmen erreicht. Das Konzept kann einfach auf andere Wellenlängen übertragen und in vielfältigen Anwendungen eingesetzt werden – der gesamte Aufbau lässt sich miniaturisieren und in ein sehr kompaktes Lasermodul integrieren.

Publication

[1] C. Mourikis, G. Blume, A. Maaßdorf, J. Fricke, K. Paschke, G. Lucas-Lectin, G. Tränkle: "Coherent beam combining progress on diode lasers and tapered amplifiers at 808 nm", Proc. of SPIE, vol. 11983, High-Power Diode Laser Technology XX, Photonics West, Hybrid Event, San Francisco, USA, 119830D (2022).

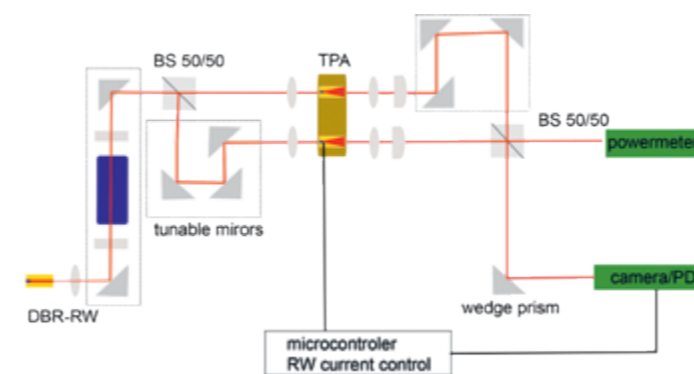


Fig. 2. Schematic of the experimental setup for coherent beam combining of the emission of two individual tapered amplifiers.

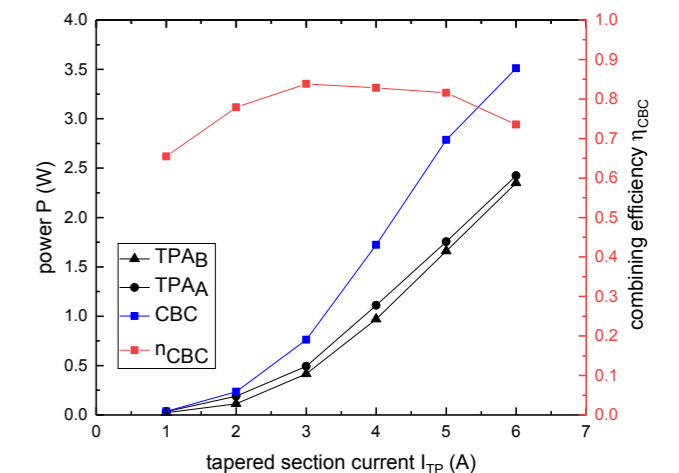


Fig. 3. Optical power and combining efficiency performance of the CBC setup, individual master oscillator power amplifiers A and B.

Shifted excitation Raman difference spectroscopy for soil inspection – out of the lab into the field

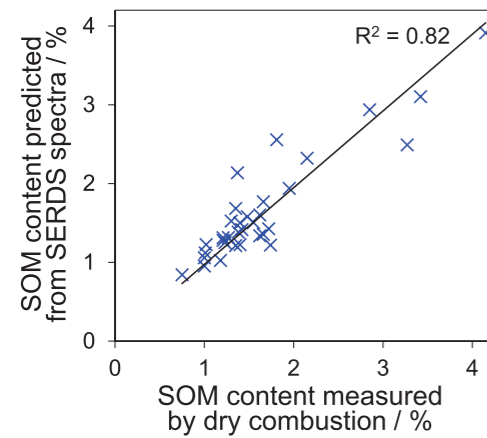


Fig. 2. SOM content predicted from SERDS spectra of 33 soil samples, using partial least squares regression plotted in dependence of SOM content measured by laboratory reference analysis.

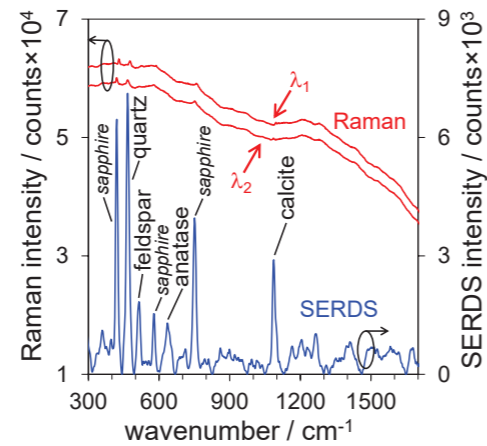


Fig. 3. Raman and SERDS spectra of loamy soil measured on-site with the portable SERDS system, enabling to identify selected soil minerals.

Precision agriculture and soil nutrient management are becoming increasingly important to boost crop productivity, increase soil health and reduce excessive use of industrial fertilizers. In situ sensor techniques can provide the necessary information for on-site decision support systems. Using Raman spectroscopy helps to identify molecules and thus enables qualitative and quantitative sample analysis. This is because the powerful and well-established spectroscopic technique delivers Raman signals in a fingerprint-like spectrum. However, the weak Raman signals are often masked by strong fluorescence background signals and daylight interferences when used outdoors. A solution for this problem offers shifted excitation Raman difference spectroscopy (SERDS), which efficiently separates Raman signals from such disturbing backgrounds. SERDS utilizes a physical approach with two slightly shifted laser wavelengths.

Initial laboratory investigations with customized, in-house developed diode lasers and a specialized setup demonstrated that SERDS can identify selected soil substances. We successfully extracted characteristic Raman signals of quartz, feldspar, anatase, calcite and amorphous carbon from intense fluorescence interference and therefore verified that the method enables molecule-specific soil analysis. Since soil organic matter (SOM) is important for overall soil health, e.g., fertility, nutrient cycling and structure, we started an attempt to determine SOM

content using SERDS. Partial least squares regression of SERDS spectra against reference data obtained by dry combustion showed good prediction of SOM content, highlighting the suitability of SERDS for quantitative soil analysis.

To translate the measurement concept from the laboratory to field settings, we have developed a portable SERDS system for on-site soil analysis as part of the I4S (Intelligence for Soil) consortium. Key components include an in-house realized 785 nm dual-wavelength diode laser, implemented into a turn-key system suitable for SERDS, which has been developed by FBH's Prototype Engineering Lab. We have supplemented this system with a customized probe for soil inspection, a cutting-edge spectrometer with CCD detector and in-house developed proprietary software for control and data management. All components including battery are integrated into a rugged case suitable for field operation.

We successfully conducted an initial trial of the portable SERDS system under realistic field conditions at a research site of our I4S project partner Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB). This experiment demonstrated that SERDS is able to efficiently extract Raman signals of soil substances from backgrounds caused by fluorescence and ambient light. In the case of loamy soil, for example, our system permits



Fig. 1. In-house developed and realized portable SERDS sensor system applied in a real-world test. The system successfully performed on-site SERDS measurements under field conditions.

for on-site identification of the soil constituents quartz, feldspar, anatase and calcite, thus confirming the previous results of our SERDS laboratory investigations. In late summer 2021, we conducted a field measurement campaign in an agricultural farm field within the I4S consortium. We performed our measurements with the portable SERDS system in conjunction with complementary sensor techniques of other project partners. Initial assessment of the recorded SERDS data looks promising, and detailed analysis is currently in progress. We are therefore convinced that the developed portable SERDS system is a step change for on-site soil investigations.

The work was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in the project RaMBo (Raman-Messsystem zur ortsspezifischen Bodenanalytik) within the consortium I4S in the frame of the funding measure BonaRes (Soil as a Sustainable Resource for the Bioeconomy) under grant numbers 031A564C and 031B0513C.

Publications

M. Maiwald, K. Sowoidnich, B. Sumpf, "Portable shifted excitation Raman difference spectroscopy for on-site soil analysis", *Journal of Raman Spectroscopy*, doi: 10.1002/jrs.6400 (2022).

K. Sowoidnich, S. Vogel, M. Maiwald, B. Sumpf, "Determination of soil constituents using shifted excitation Raman difference spectroscopy", *Applied Spectroscopy*, vol. 76, no. 6, pp. 712–722 (2022).

Die Präzisionslandwirtschaft wird immer wichtiger, wenn Ernteerträge erhöht, die Bodengesundheit verbessert und Überdüngung vermieden werden sollen. In-situ-Sensoren spielen dabei eine wichtige Rolle. Mittels shifted excitation Raman difference spectroscopy (SERDS) lassen sich molekül-spezifische Raman-Signale von Störeinflüssen wie etwa Fluoreszenz oder Umgebungslicht effektiv trennen. In Laboruntersuchungen konnten wir mithilfe von SERDS die Bodenbestandteile Quarz, Feldspat, Anatas, Calcit und amorphes Kohlenstoff identifizieren. Auch der Humusgehalt im Boden ließ sich so vorhersagen.

Nach diesen erfolgreichen Messungen im Labor haben wir ein portables SERDS-System für die Bodenanalytik im Feld entwickelt. Es basiert auf einem 785 nm Zwei-Wellenlängen-Diodenlaser als Kernstück eines Turn-Key-Systems, das unser institutseigenes Entwicklungszentrum konstruiert hat. Ergänzt mit einer maßgeschneiderten Optode, einem Spektrometer und einer selbst entwickelten Software wurden alle Komponenten einschließlich Batterie in einen robusten, feldtauglichen Koffer integriert. SERDS-Untersuchungen auf Testflächen und landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen haben die Eignung des Systems demonstriert, das die Vor-Ort-Bodenanalytik deutlich verbessert.

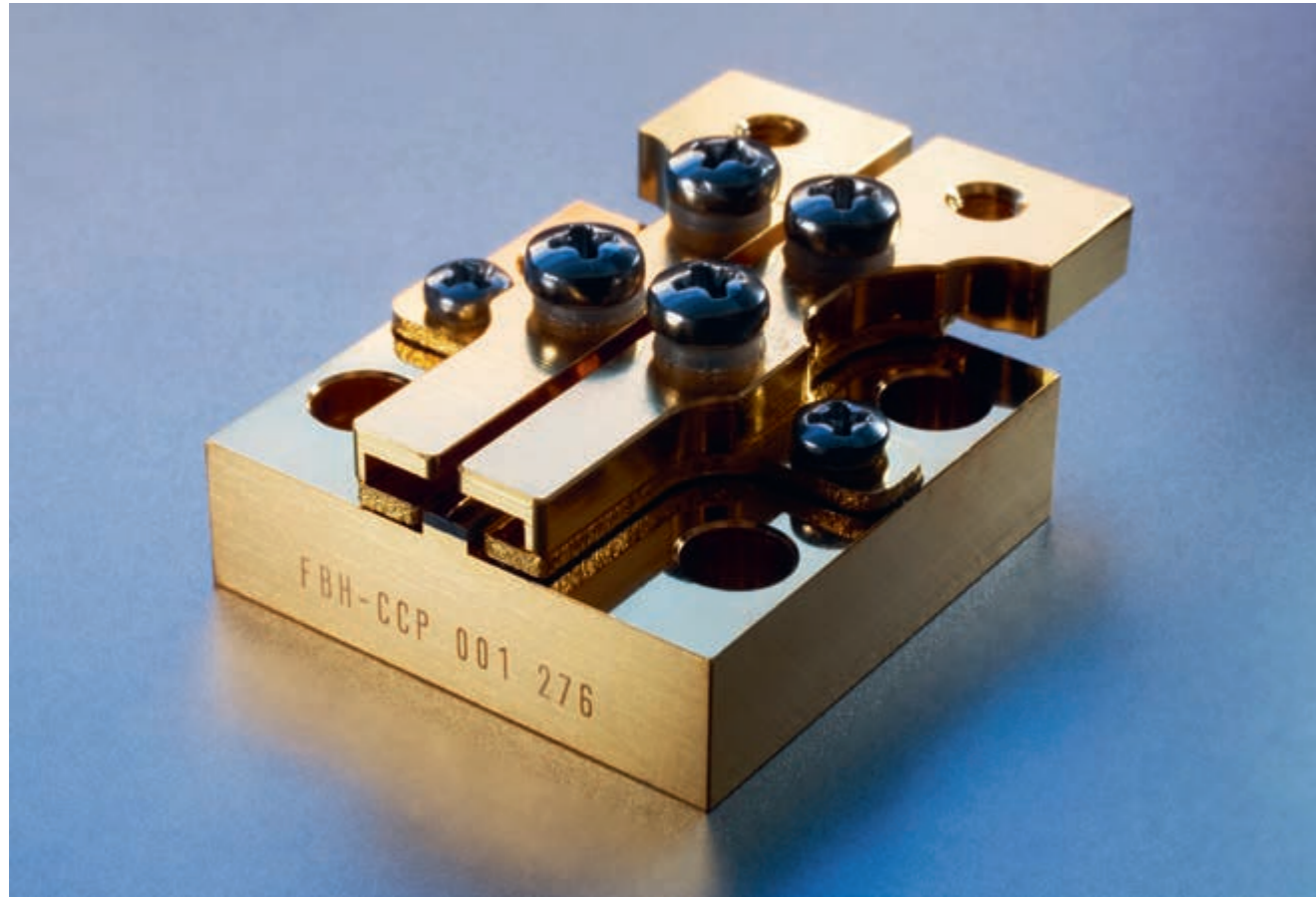


Fig. 1. Mounted DBR tapered laser diode.

785 nm DBR tapered diode lasers with high output power for large spot-size Raman measurements

Raman spectroscopy is a powerful tool for the analysis of different targets in life sciences, capable of distinguishing between different molecules. The non-destructive and substance specific method enables, e.g., to detect minerals and nutrients in soil or carotenoids in skin. Soil science and medicine are only two examples where Raman measurements can be applied.

One key element for Raman measurements is the excitation light source, which has to fulfill specific requirements concerning optical output power and spectral width. Semiconductor laser diodes, e.g., spectrally stabilized diode lasers with implemented distributed Bragg reflector (DBR) gratings are well suited. A well-established wavelength for Raman spectroscopy is 785 nm. This near-infrared wavelength can be accessed with GaAs-based ridge-waveguide DBR diode lasers. The DBR gratings not only

ensure a fixed wavelength but also narrow single mode emission. Narrow emission is required to match the typical resolution of the Raman spectrometer of about 0.5 nm. Output powers of several tens of milliwatts are used as excitation power for spot-sizes ranging from 20 μm to 100 μm .

For real-world Raman measurements it can be useful to enlarge the excitation spot-size. Especially with heterogeneous samples, a significant area of the specimen must be examined. One approach is to enlarge the excitation spot-size, but this requires an increased optical output power from the excitation light source. Here, a tapered DBR diode laser offers a suitable solution. While maintaining spectrally narrow emission, the optical output power is upscaled to several watts compared to DBR ridge-waveguide lasers. Thus, a mentionable enlargement of

the excitation area is possible. Additionally, output powers in the watt range enable to develop innovative Raman imaging techniques, which combine lateral and spectral information.

Recently, we demonstrated tapered DBR diode lasers emitting around 785 nm that offer single-mode emission exceeding an output power of 6 W. Fig. 1 shows a mounted tapered DBR diode laser. As can be seen in Fig. 2, the overall length of the devices is 4 mm. The DBR section consists of a tapered 500 μm long 10th order surface grating, which was written using e-beam lithography. The 1 mm long ridge-waveguide (RW) section and the tapered section with 2.5 mm length have separate electrical contacts. The RW width is 2.2 μm , and the RW is coupled to the tapered section. The tapered section is defined by implantation and widens to a width of about 260 μm at the front facet (taper angle 6°). The emission wavelength of the fabricated devices is about 783 nm. At 6 W output power, the measured spectrum shows a full width at half maximum of about 19 pm, limited by the resolution of the used spectrometer (Fig. 3). To the best of our knowledge this is the highest reported output power for monolithic DBR tapered laser diodes with wavelength stabilization around 785 nm.

This work was funded by the Leibniz Association within the HYPERAM project (SAW-2016-IPHT-2).

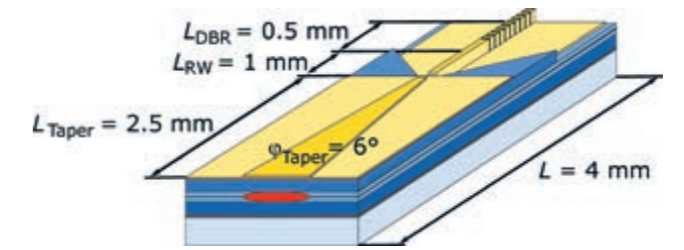


Fig. 2. DBR tapered laser diode emitting at 783 nm with a DBR length of 0.5 mm, an RW length of 1 mm, and a taper length of 2.5 mm.

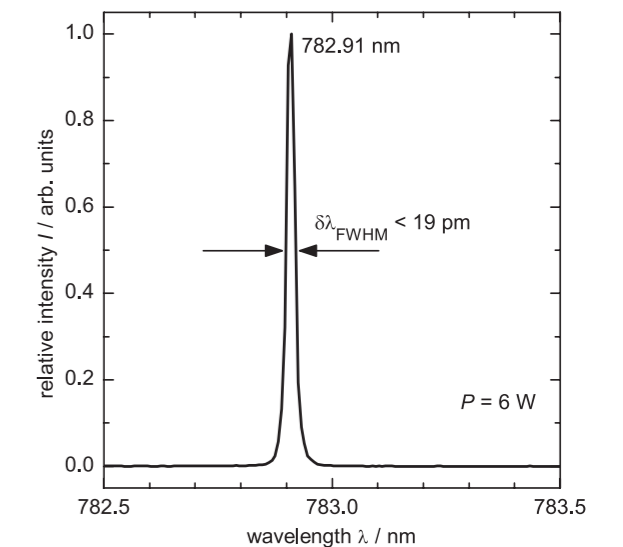


Fig. 3. Emission spectrum of a DBR tapered laser diode at an optical output power of 6 W.

Publications

B. Sumpf, L. S. Theurer, M. Maiwald, A. Müller, A. Maaßdorf, J. Fricke, P. Ressel, G. Tränkle, "Narrow spectral linewidth 785 nm DBR tapered lasers with 7 W output power", *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XX*, 1170500 (2021).

B. Sumpf, L. S. Theurer, M. Maiwald, A. Müller, A. Maaßdorf, J. Fricke, P. Ressel, G. Tränkle, "783 nm wavelength stabilized DBR tapered diode lasers with a 7 W output power", *Appl. Opt.* 60, 5418 (2021).

B. Sumpf, L. S. Theurer, M. Maiwald, A. Müller, A. Maaßdorf, J. Fricke, P. Ressel, A. Knigge, G. Tränkle, "Comparison of the electro-optical, spectral, and beam parameters of 785 nm DBR tapered lasers with different grating lengths", *Novel In-Plane Semiconductor Lasers XXI*, 120210H (2022).

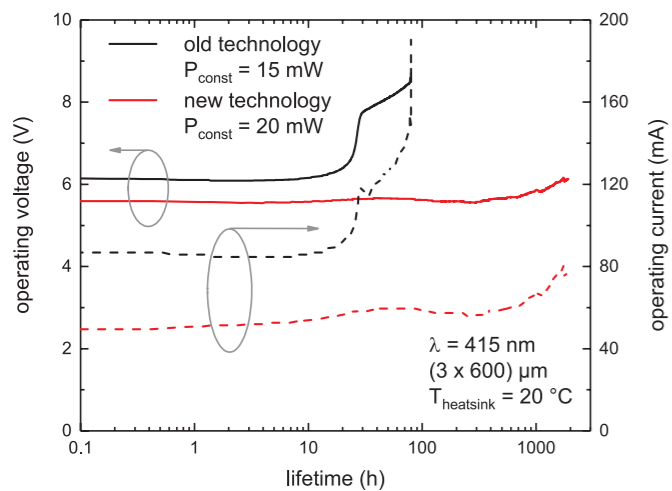
Die Raman-Spektroskopie ist eine zerstörungsfreie Technik, die in vielen Anwendungen eingesetzt werden kann. Mit dieser Methode lassen sich verschiedenste Substanzen untersuchen und beispielsweise Nährstoffe im Boden oder Karotinoide in der Haut nachweisen. Insbesondere bei heterogenen Proben kann es vorteilhaft sein, einen großen Anregungsfleck zu beleuchten. Dadurch lassen sich mit einer einzelnen Messung verschiedene Stoffe innerhalb einer Probe detektieren.

Eine geeignete Raman-Lichtquelle mit großem Anregungsfleck muss spektral schmale und einmodige Strahlung bei hoher Leistung liefern. Diese Eigenschaften bieten von uns entwickelte Laserquellen, die speziell auf die Raman-Spektroskopie zugeschnitten sind. Es handelt sich um DBR (engl. distributed Bragg reflector) Trapezlaser, die bei 783 nm Wellenlänge emittieren. Diese Laser erreichen höchste Ausgangsleistungen von mehr als 6 W bei zugleich spektral schmalbandiger Emission. Dies sind die bislang höchsten Ausgangsleistungen mit spektraler Stabilisierung bei dieser Art von Laserdioden im Emissionsbereich um 785 nm, die uns bekannt sind.



➊ GaN-based laser diodes in hermetically sealed TO packages.

Towards GaN-based laser diodes with long lifetimes for quantum technology applications



➋ Fig. 1. Typical lifetime measurements before and after optimizing p-contacts and activation technology.

GaN-based laser diodes emitting in the violet-blue wavelength region offer a wide range of applications such as optical projection, material processing, sensing, and many more. Although such devices are commercially available, physical mechanisms that limit their reliability are still not fully understood. At FBH, GaN lasers with narrowband emission at a wavelength of 420 nm are being developed for use in a rubidium-based optical atomic clock in space. We have thoroughly investigated reliability-limiting mechanisms in these devices, thus obtaining a better understanding that has allowed us to significantly increase the lifetime of the laser diodes.

Based on extended long-term stress tests, we identified coupled voltage-light power degradation as the stability-limiting degradation process. In CW operation, the voltage of the laser diode increases steeply after a certain time (see Fig. 1). During voltage rise, the laser threshold increases and so does the operating current. As a result, the electrical load is elevated and the laser fails sooner or later. Spatially resolved electro- and photolumi-

nescence measurements of the devices before and after aging indicate that the spatial distribution of the hole current on the p-side of the semiconductor changes, which leads to unpumped areas in the active region. The accompanying reduction in the current-carrying area causes the shown degradation of the electrical parameters of the laser.

Degradation is triggered by the following two technological aspects: the fabrication of the electrical p-contacts and the activation of the p-conductivity. The activation is brought about by a thermal process that activates magnesium acceptors by removing hydrogen bound to them. If this step is not optimized and, for example, too much hydrogen remains in the semiconductor, hydrogen redistributes in the semiconductor during operation and thus changes the current flow.

In addition to the lowest possible contact resistance, the contact metal and the nature of the interface are also decisive factors for device performance. If, for example, Pt instead of Pd is used as p-contact metal, it leads to accelerated aging. This is attributed to the ability of Pt to first store hydrogen and then release it to the semiconductor under current flow. Pd, however, tends to form voids at its interface to GaN. This creates an inhomogeneous contact, which leads to an inhomogeneous hole current on the p-side of the semiconductor. This effect again accelerates aging. Optimizations of deposition conditions, surface cleaning as well as contact annealing have made it possible to create almost void-free Pd/GaN interfaces. The combination of optimized p-contacts and activation conditions has contributed significantly to finally increase the lifetime from a few 10 h to more than 1,000 h (see Fig. 1).

Publications

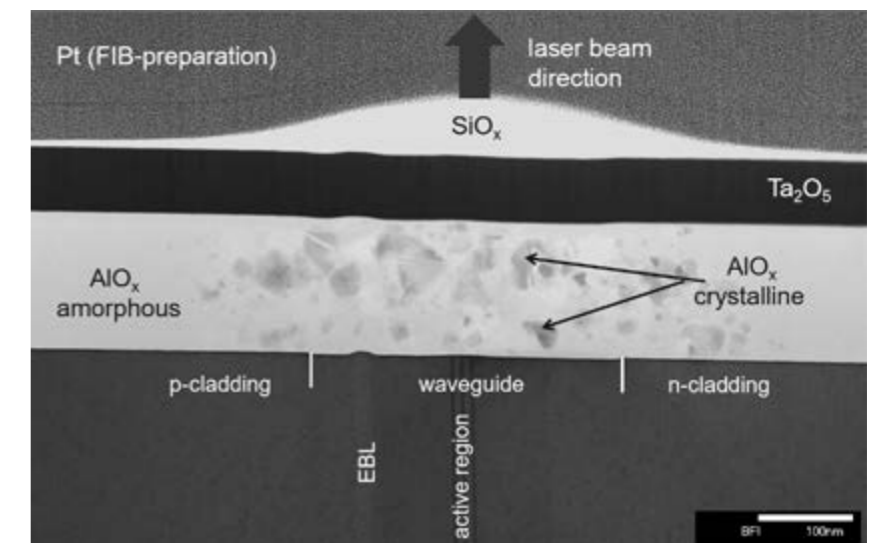
E. Freier, J. Glaab, J. Ruschel, V. Hoffmann, J. H. Kang, M. Norman-Reiner, H. Wenzel, M. Kneissl, S. Einfeldt, "Influence of the hydrogen level in (InAlGa)N-based laser diodes on the stability of the device's operating voltage", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 54, no. 13, pp. 135103 (2021).

L. Uhlig, C. Becht, E. Freier, J. H. Kang, V. Hoffmann, C. Stoelmacker, S. Einfeldt, U. T. Schwarz, "Micro-electroluminescence and micro-photoluminescence study on GaN-based laser diode aging", *Proc. of SPIE*, vol. 12001, pp. 1200106 (2022).

After optimizing the semiconductor, we started to investigate the stability of the laser facets. Here, the formation of a SiO_x layer on the facets of facet-coated but un-packaged devices in CW operation was observed (see Fig. 2). This process presumably changes the facet reflectivity. As a result, instabilities of the optical power occur. Since the laboratory atmosphere could be identified as the source of the deposits, investigations are currently being carried out on lasers in hermetically sealed TO housings under defined atmospheres, which would also allow them to be used in space.

Für den Einsatz in einer Rubidium-basierten optischen Atomuhr im Weltraum entwickeln wir derzeit schmalbandige 420 nm GaN-Laser. Jedoch sind die Mechanismen, die die Lebensdauer von GaN-basierten Laserdioden begrenzen, noch immer nicht vollständig verstanden. Wir haben daher Alterungsmessungen durchgeführt und eine gekoppelte Spannung-Lichtleistungsdegradation als den stabilitätsbegrenzenden Degradationsprozess identifiziert. Eine räumliche Veränderung des Löcherstroms auf der p-Seite des Halbleiters reduziert dabei die stromdurchflossene Fläche und führt zu ungenutzten Bereichen in der aktiven Zone. Dadurch steigen gleichzeitig die Spannung und der Betriebsstrom an. Durch Optimierungen des Prozesses zur Aktivierung der p-Leitfähigkeit sowie der p-Kontakte konnten wir die Lebensdauer unserer GaN-Laser auf über 1.000 h erhöhen.

Zudem haben wir festgestellt, dass sich unter Laboratmosphäre SiO_x -Ablagerungen auf den Laserfacetten bilden. Diese führen zu einer instabilen Ausgangsleistung. Wir untersuchen daher zurzeit den Betrieb der Laserchips unter definierten Atmosphären in hermetisch versiegelten TO-Gehäusen, um sie von der Umgebung unabhängig zu machen.



➌ Fig. 2. A SiO_x layer has formed on the output facet coating of a GaN laser diode during CW operation.

Spectrally pure far-UVC emission from LEDs using dielectric band pass filters for skin-tolerant UV antiseptics

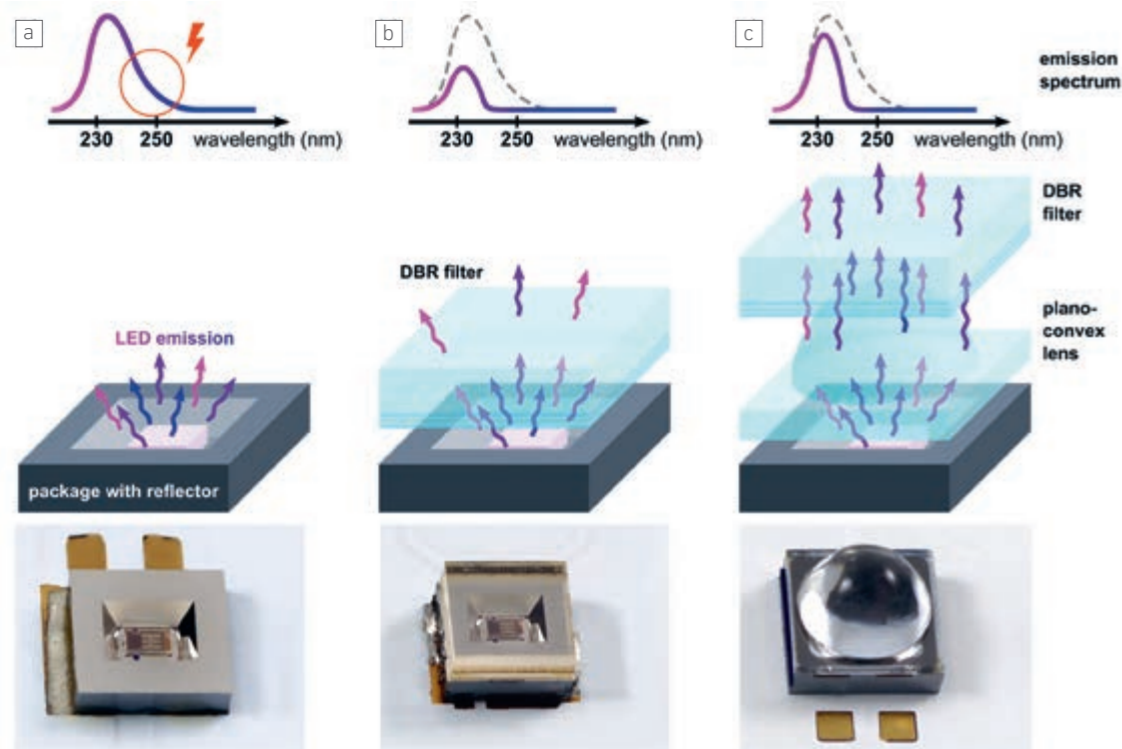


Fig. 1. Influence of the filter on the emitted spectrum of flip-chip mounted far-UVC LEDs in a package (a) without a filter, (b) with a DBR filter lid, and (c) with a plano-convex lens and an additional DBR filter plate.

AlGaIn-based ultraviolet-C (UVC) light emitting diodes (LEDs) with an emission wavelength below 240 nm (far-UVC) are attracting great interest for applications like gas sensing and disinfection. In particular, we have demonstrated that far-UVC LEDs can be used to inactivate multi-resistant pathogens with minimum damage to animal or human skin [1, 2]. Due to the spectral width of the LED emission, spectral filters are required in order to reduce the skin-damaging long-wavelength UVC contribution (Figs. 1a & 1b). However, the emission of the UVC LEDs over a wide angular range leads to a preferentially inclined transmission through the filter. Together with the angle-dependent shift of the cut-off wavelength of the filter, this limits the far-UVC power that can be used after transmission through the filter (Fig. 1b).

Within our Joint Lab GaN Optoelectronics, operated by Ferdinand-Braun-Institut and Technische Universität Berlin, we have devel-

oped a sophisticated packaging concept in collaboration with the CiS Forschungsinstitut. This concept uses a Si-based package with an integrated aluminum reflector and an additional plano-convex lens to collimate the LED emission and increase the transmission through the distributed Bragg reflector (DBR) filter (Fig. 1c) [3].

In a first step, we investigated the angle-dependent emission spectra of far-UVC LEDs without and with a DBR filter in front of the LED package (Fig. 2). Without filter, the emission spectrum of the LED is independent of the emission angle. Only the intensity decreases with increasing emission angle, following a typical UVC LED far-field radiation pattern. An additional filter in front of the LED reduces the contributions at long wavelengths (> 245 nm) by almost two orders of magnitude. However, it also reduces the power at the peak emission wavelength of 233 nm for emission angles larger than 30°.

Based on this result, we used a plano-convex lens with a parabolic shape in a second step to collimate the LED emission. Without lens, the relative emission power within a viewing angle of 180° (half dome) decreases from 100% to 24% when using a filter. With an additional plano-convex lens, the relative emission power within a viewing angle of 180° is reduced to 82% due to additional reflections at the lens' surfaces. However, a larger portion of the light transmits through the filter within smaller viewing angles, resulting in a relative emission power of 37%.

We have confirmed these theoretical considerations by the experimental result. The relative emission power was almost tripled from 9% to 25% at a distance of 5 cm over an area of 7 cm in diameter, resulting in a spectrally pure far-UVC radiation with an irradiance of 0.37 mW/cm².

Finally, an irradiation system comprising 120 LEDs, each equipped with a lens, and a common filter plate in front was realized. Our project partners Charité – Universitätsmedizin Berlin and Universitätsmedizin Greifswald have used this system to inactivate bacteria strains in concentrations of up to 2 x 10⁶ cfu/spot with a dose of 40 mJ/cm² without seriously damaging the human skin. Cyclobutane-Pyrimidine-Dimer (CPD) damages occurred only in the uppermost layer of the epidermis (Fig. 3) – similar to the use of 222 nm KrCl excimer lamps – and were even further reduced by the self-repair mechanisms of the skin.

Fig. 3. Paraffin section of human skin, stained for CPD damage (dark red cells) (a) without irradiation and (b) after 40 mJ/cm² of 233 nm LED irradiation.

AlGaIn-basierte Leuchtdioden (LEDs) mit einer Emissionswellenlänge unter 240 nm (fern UVC) stoßen bei Anwendungen wie Gas-Sensorik oder Desinfektion auf großes Interesse. Es wurde insbesondere gezeigt, dass Fern-UVC-LEDs eingesetzt werden können, um multiresistente Krankheitserreger zu inaktivieren, ohne die menschliche Haut ernsthaft zu schädigen. Dafür wird mit einem spektralen Filter der hautschädigende langwellige UVC-Emissionsbeitrag reduziert.

Im Joint Lab GaN Optoelectronics haben wir nun ein verbessertes LED-Gehäusekonzept entwickelt, welches die UVC-Strahlung mithilfe einer plankonvexen Linse vor dem Filterdurchgang kollimiert. Simulationen und Experimente zeigen, dass sich dadurch die nutzbare Fern-UVC-Lichtleistung eines LED-Strahlers fast verdreifacht und die Bestrahlungszeiten entsprechend verkürzt werden können.

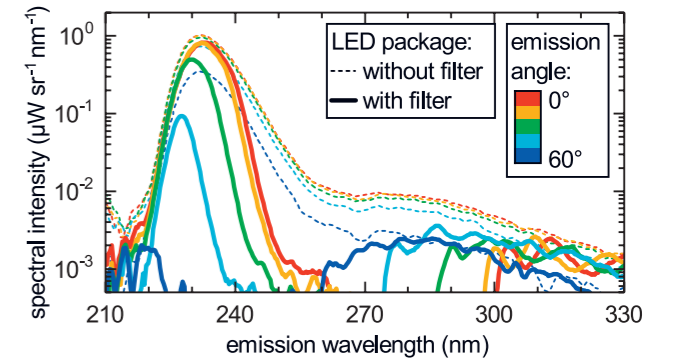
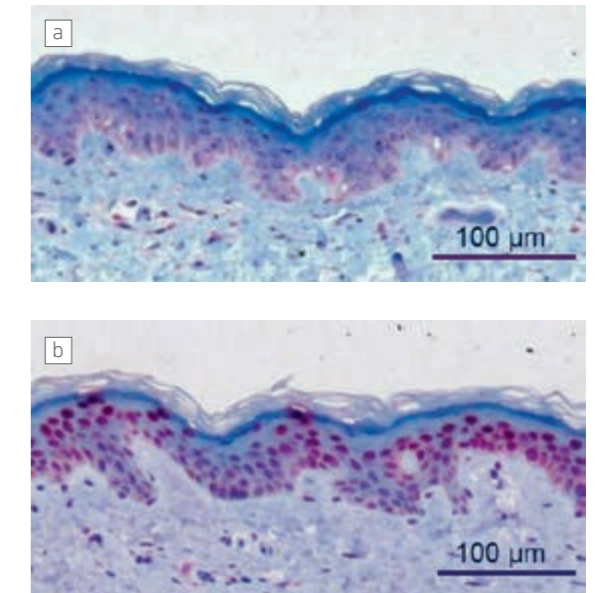


Fig. 2. Angle-dependent emission spectra of far-UVC LEDs without (dashed lines) and with (solid lines) a DBR filter lid for various polar emission angles between 0° (normal to the package plane) and 60°.



Publications

[1] J. Glaab, N. Lobo-Ploch, H. K. Cho, T. Filler, H. Gundlach, M. Guttman, S. Hagedorn, S. B. Lohan, F. Mehnke, J. Schleusener, C. Sicher, L. Sulmoni, T. Wernicke, L. Wittenbecher, U. Woggon, P. Zwicker, A. Kramer, M. C. Meinke, M. Kneissl, M. Weyers, U. Winterwerber, S. Einfeldt, "Skin tolerant inactivation of multiresistant pathogens using far-UVC LEDs", Scientific Reports 11, 14647 (2021).

[2] P. Zwicker, J. Schleusener, S. B. Lohan, L. Busch, C. Sicher, S. Einfeldt, M. Kneissl, A. A. Kühl, C. M. Keck, C. Witzel, A. Kramer, M. C. Meinke, "Application of 233 nm far-UVC LEDs for eradication of MRSA and MSSA and risk assessment on skin models", Scientific Reports 12, 2587 (2022).

[3] M. Guttman, N. Lobo-Ploch, H. Gundlach, F. Mehnke, L. Sulmoni, T. Wernicke, H. K. Cho, K. Hilbrich, A. Kübler, M. Friedler, T. Filler, I. Käpplinger, D. Mitrenga, C. Maier, O. Brodersen, T. Ortlepp, U. Woggon, S. Einfeldt, M. Kneissl, "Spectrally pure far-UVC emission from AlGaIn-based LEDs with dielectric band pass filters", J. Phys. D: Appl. Phys. 55, 205105 (2022).

Integrated Quantum Technology

Integrierte Quantentechnologie

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

- > **Quantum photonic components** – development of electro-optical components and hybrid micro-integrated modules providing 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 entangle single quantum memories with single photons, thus providing the basis for secure and versatile future quantum communication and information platforms. Another target is to develop quantum magnetometers for highly sensitive and versatile sensing applications.
- > **Photonic quantum technologies** – development of quantum devices based on optical chips that can be directly interfaced with optical fibers, e.g. for tap-proof communications. The quantum chips are based on waveguides, directional couplers, optical circulators and resonators that will be co-integrated with ultra-strong optical nonlinearities.



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

- > **Quantenphotonische Komponenten** – Entwicklung von elektro-optischen Komponenten und hybrid-mikrointegrierten Modulen, die kohärente Strahlung für die Implementierung von quantenoptischen Sensoren oder Quantencomputern auf Basis von kalten Ionen oder neutralen Atomen erzeugen. 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, einzelne Quantenspeicher mit einzelnen Photonen zu verschränken und damit die Grundlage für künftige Plattformen für die Quantenkommunikation und -informationsverarbeitung zu schaffen, die sicherer und vielseitiger sind als bisherige Systeme. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung von Quantenmagnetometern für hochempfindliche und vielseitige Sensoranwendungen.
- > **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.

Comprehensive investigation of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ as a material for miniaturized optical isolators

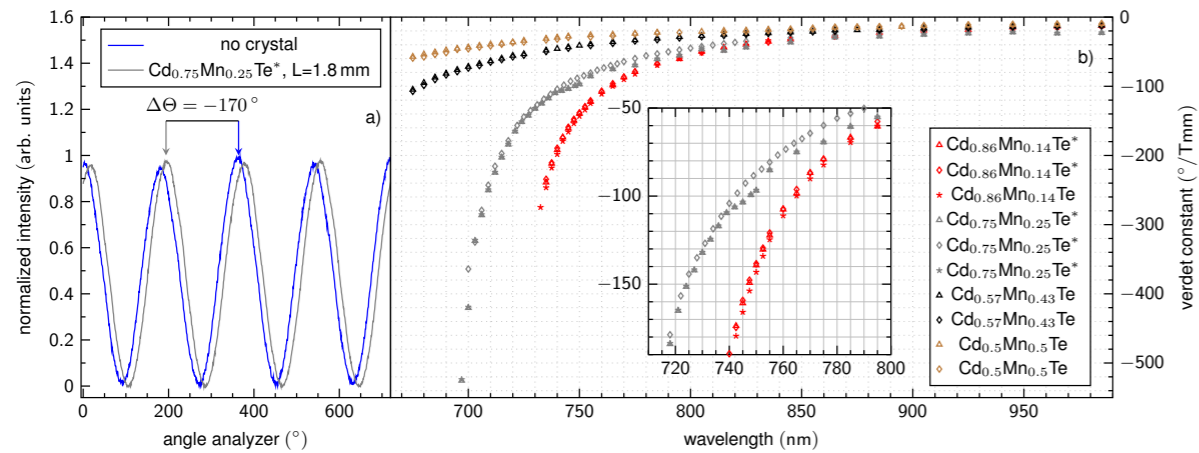


Fig. 1a) A measured Faraday rotation for $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$ and $\lambda = 715 \text{ nm}$ is shown. b) Wavelength-dependent Verdet constants of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystals with different stoichiometric ratios are plotted. Crystals indicated with an asterisk are anti-reflection coated.

The development of compact optical isolators with volumes below $7 \times 7 \times 7 \text{ mm}^3$ for the wavelength range covered by GaAs-based laser diodes crucially depends on the availability of a suitable magneto-optic material. At best, it should combine both a high Verdet constant (i.e. the ability to rotate the polarization of light) and a low absorption to minimize optical losses. Especially a high Verdet constant is critical as it reduces the over the length of the crystals integrated magnetic field necessary for a certain rotation of the incoming polarization. High Verdet constants of the magneto-optic material will therefore directly lead to very compact optical isolators.

One possible material that unites high Verdet constants at acceptable optical loss coefficients is the diluted material $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. By the defined inclusion of manganese to CdTe, both the band-gap and the wavelength-dependent Verdet constant can be tuned [E_g ranging from 1.5 eV (827 nm) for CdTe to 2.1 eV (590 nm) for $\text{Cd}_{0.50}\text{Mn}_{0.50}\text{Te}$]. This fact allows to optimize the alloy to an application-specific wavelength. To that end, we have analyzed eleven different $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystals with stoichiometric ratios from $\text{Cd}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}\text{Te}$ to $\text{Cd}_{0.50}\text{Mn}_{0.50}\text{Te}$. Their dimensions are below $1.8 \times 1.8 \times 2 \text{ mm}^3$ and are thus comparable to those that can be used in the recently introduced design of the magnet for a miniaturized optical isolator. Measurements of the wavelength-dependent Verdet constants are shown in Fig. 1.

From the measured Faraday rotations as exemplarily shown in Fig. 1a, we have calculated the corresponding Verdet constants

of all analyzed $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystals for a large set of wavelengths (Fig. 1b). Introducing manganese to CdTe leads to a circular birefringence with increasing differences of the refractive indices when getting closer to the absorption edge. The effect scales with the relative content of manganese so that we generally observe higher absolute values of the Verdet constants for larger manganese contents. As can be seen, absolute values of Verdet constants over $50^\circ/\text{T}\times\text{mm}$ and more can be reached over a large wavelength range. The analyzed alloys are therefore suitable candidates for compact optical isolators.

However, the optical losses of the magneto-optic material are also important for the performance of the optical isolator. For that reason, we ran wavelength-dependent measurements of the specific reflection and transmission values comparable to those shown in Fig. 1. We derived the optical loss coefficients from the measurements and find values in the range of 0.2/mm and below for all stoichiometric ratios. The optical loss coefficient generally decreases for longer wavelengths and varies for different crystals. Besides the intrinsic absorption the optical losses are also determined by well-known Te inclusions that block incoming light and differ in their amount and sizes. In Fig. 3 we summarize the measurements and calculate both the length and optical losses of a crystal when we aim for a Faraday rotation of $\Theta = 45^\circ$ (necessary for an optical isolator) and assume a magnetic field of $B = 0.55 \text{ T}$. The latter can be reached with a FeNdB alloy and aforementioned dimensions of the magnet (see Fig. 2). If we fix an optical loss of e.g. 30% (-1.5 dB)

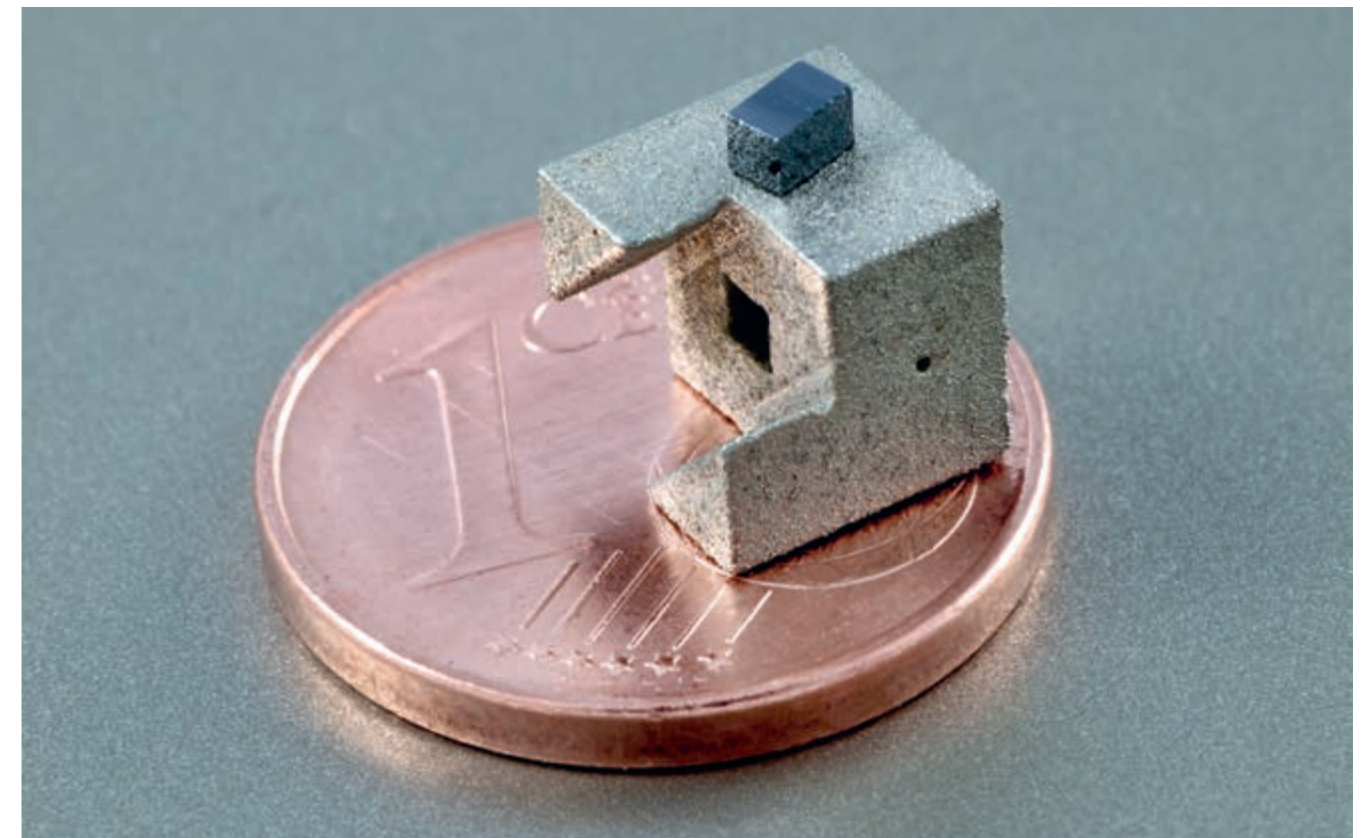


Fig. 2. A FeNdB magnet (bottom) and a $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystal (top) is shown. Dimensions of the crystal are $1.4 \times 1.4 \times 2.0 \text{ mm}^3$. The crystal was provided by International Crystal Laboratories.

we can find suitable candidates of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ for wavelengths between 675 nm and 880 nm. One should mention that lower manganese contents than 14% lead to higher Verdet constants at larger wavelengths. Although not shown here, the applicable range of wavelengths is therefore even larger. With this investigation, we have a broad-range analysis of the diluted material $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ at hand that can be used to design custom miniaturized optical isolators for future laser modules developed at FBH. We can hence enlarge the pool of possible applications and strengthen FBH's role in developing opto-electronic and photonic modules specifically for quantum sensing and quantum computing applications.

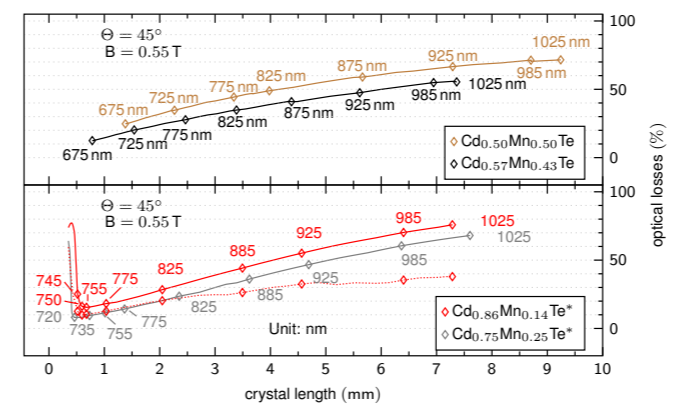


Fig. 3. Lengths of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystals with corresponding absorption losses that are required to reach a Faraday rotation of $\Theta = 45^\circ$ (necessary for an optical isolator) with a magnetic field of $B = 0.55 \text{ T}$.

Die Entwicklung von miniaturisierten optischen Isolatoren hängt im hohen Maße von der Wahl des magneto-optischen Materials ab. Das betrifft insbesondere den Wellenlängenbereich, der mit GaAs-basierten Laserdioden direkt zugänglich ist. Ein entsprechendes Material sollte zwei entscheidende Eigenschaften haben: eine hohe Verdet Konstante und es sollte nur geringe optische Verluste aufweisen.

Ein möglicher Kandidat ist $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, welcher über die Wahl des stöchiometrischen Verhältnisses an die experimentellen Anforderungen angepasst werden kann. Daher haben wir Messungen der Verdet-Konstante und des optischen Verlustkoeffizienten von $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ -Kristallen mit verschiedenen stöchiometrischen Verhältnissen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass aus den untersuchten Kristallen optische Isolatoren für Wellenlängen zwischen 675 nm und 880 nm bei Verlusten <30% (-1.5 dB) realisiert werden können. Diese Messungen liefern die Basis dafür, angepasste optische Isolatoren für zukünftige Projekte zu entwickeln und so die wissenschaftliche Position des FBH zu stärken.

Publication

J. K. Furdyna, "Diluted magnetic semiconductors", J. Appl. Phys. 64 (4), R29-R64 (1988).

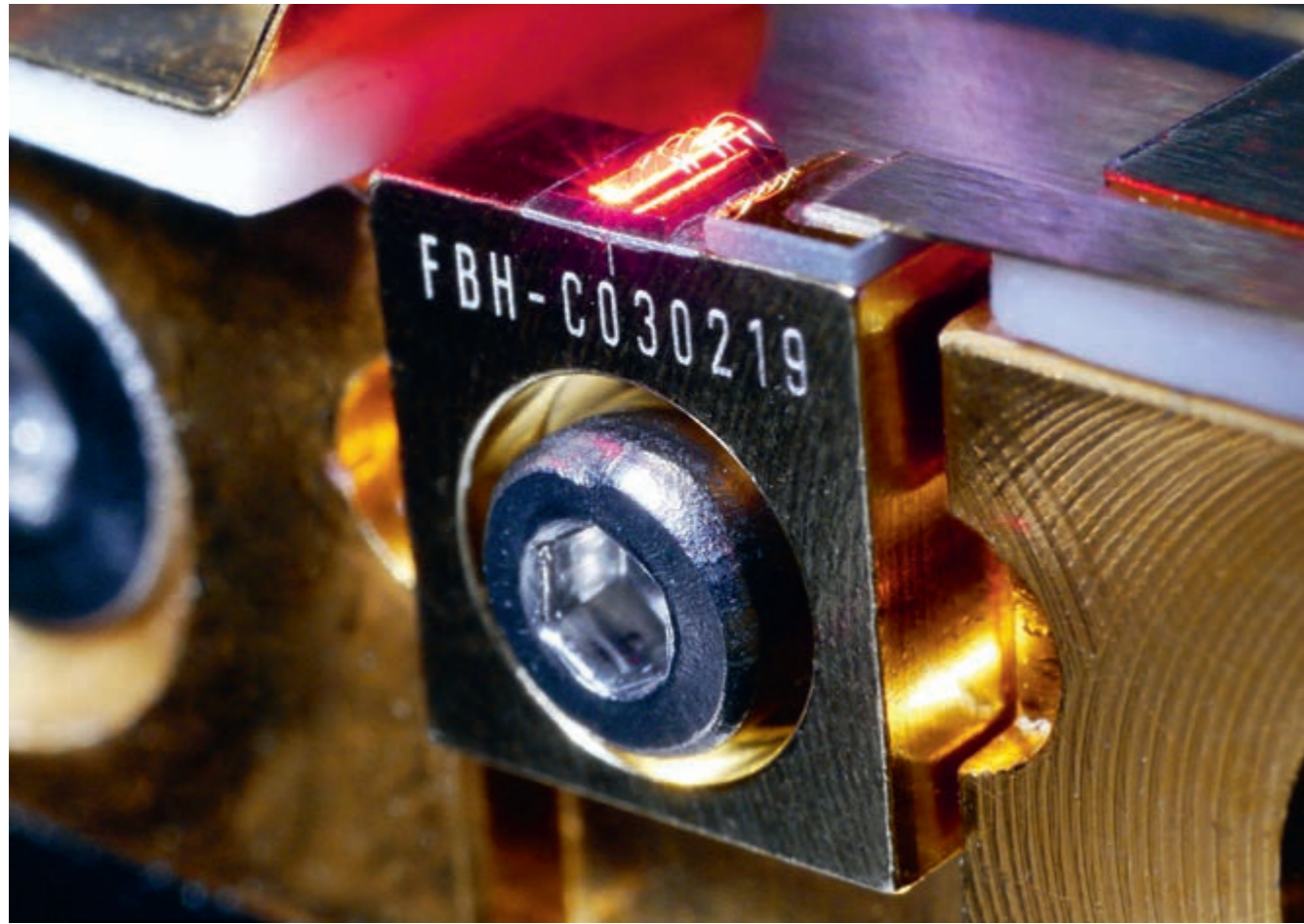


Fig. 1. Red-emitting DBR mounted on a C-mount carrier. The chip has a total length of only 2 mm.

DBR laser chips in the red wavelength range for strontium-based optical atomic clocks

Optical atomic clocks provide the most accurate time measurements available so far. Generally, atomic clocks use electromagnetic radiation of a specific frequency to excite atoms. This specific frequency serves as a reference frequency and enables very precise time measurements. Optical atomic clocks employ electromagnetic radiation in the optical range in contrast to microwaves, which have been in use in atomic clocks for more than six decades. Higher frequency and Q-factors associated with optical atomic clocks improve the measurement accuracy. More precise time measurements not only serve basic research and the definition of the second but also have the potential to improve satellite navigation.

To demonstrate that compact optical atomic clocks can be used in space, for example in global navigation satellite systems (GNSS) like the GPS or the Galileo fleet, FBH and its project partners Menlo Systems and Humboldt-Universität zu Berlin are developing a strontium-based optical clock suitable for operation in space. Our task at FBH is to realize laser modules, which not only need to be small and robust but also provide high frequency stability and high output power.

For this aim, the FBH has developed red-emitting distributed Bragg reflector (DBR) laser chips with an emission wavelength of 689.45 nm, specifically tailored to excite one of the atomic transitions of strontium atoms. This makes them suitable for

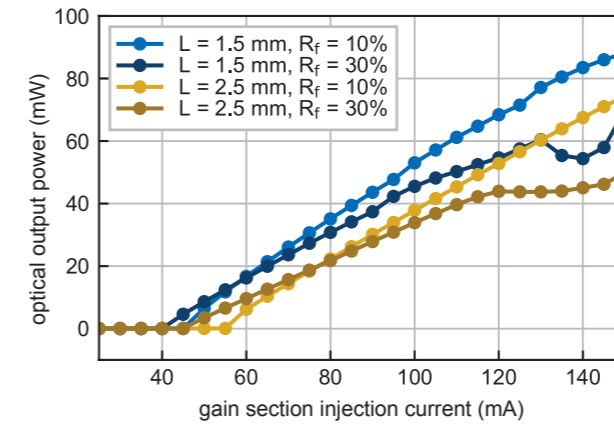


Fig. 2. Optical output power against gain section injection current. Devices with a shorter gain section length L and lower front facet reflectivity R_f yield higher output powers.

laser cooling as well as for excitation of the clock transition in strontium clocks. In these diode lasers, a ridge waveguide ensures lateral single-mode operation. Frequency stability and specificity of the emission frequency are enforced by a Bragg grating, which is realized by means of a surface grating at one end of the laser diode. Incorporating the grating into the chip yields smaller and more compact lasers than comparable systems with external gratings, making DBR lasers ideal candidates for space applications.

To optimize the design, we compared four different DBR laser configurations, where we varied the length of the laser diode gain section and the reflective coating of the front facet of the laser chips. All laser chips showed single-mode operation and could be tuned to the target wavelength. We found that shorter chips with a lower front facet reflectivity yielded the highest optical output power of 88 mW. This is four times more than previously reported for 689 nm DBR lasers in literature. Whereas longer chips with a higher front facet reflectivity provided better frequency stability, with a spectral linewidth of only 0.4 MHz (at 100 μ s measurement time), the smallest value reported for a DBR diode laser at 689 nm so far. Our findings enable us to choose a suitable chip geometry depending on the application and experimental requirements. They also underline that employing DBR lasers is a promising approach to reduce size, weight and experimental complexity of compact optical atomic clocks.

This work is supported by the DLR Space Administration with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under grant numbers DLR 50WM1853 and 50WM2053 and by the Federal Ministry of Education and Research within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

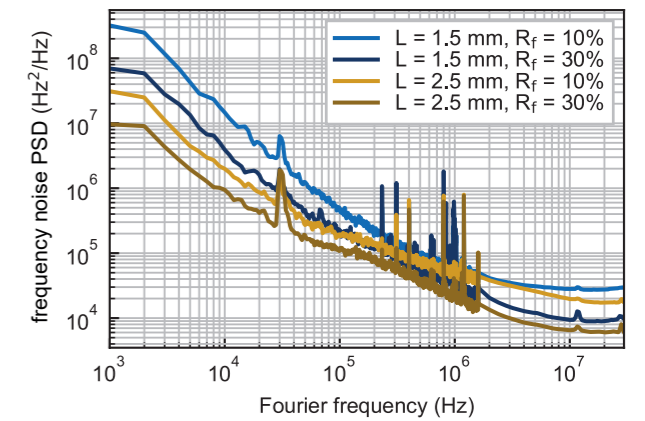


Fig. 3. Single-sided frequency noise power spectral density at a current of 115 mA. The device with a gain section length of 2.5 mm and a front facet reflectivity R_f of 30 % has the lowest frequency noise.

Optische Atomuhren liefern die aktuell präzisesten Zeitmessungen. Daher werden sie nicht nur in der Grundlagenforschung eingesetzt, sondern können auch die Genauigkeit von Satelliten-Navigationssystemen wie GPS oder Galileo verbessern. Zusammen mit den Projektpartnern Menlo Systems und Humboldt-Universität zu Berlin entwickeln wir am FBH derzeit eine weltraumgeeignete optische Atomuhr auf Strontium-Basis.

Zu diesem Zweck realisieren wir die dafür benötigten Lasermodule mit hoher Frequenzstabilität und haben Distributed-Bragg-Reflector-Laserchips mit 689,45 nm Wellenlänge entwickelt. Bei diesem Lasertyp wird ein Bragg-Gitter als Oberflächengitter implementiert, das für eine hohe Frequenzstabilität sorgt. Dank der Integration des Gitters in den Chip lässt sich ein besonders kleines und kompaktes System realisieren, das sich ideal für den Einsatz im Weltraum eignet. Um das Design des DBR-Lasers zu optimieren, haben wir vier verschiedene Chip-Geometrien mit unterschiedlichen Längen und Frontfacetten-Reflektivitäten verglichen. Längere Chips mit höherer Reflektivität erzielten dabei die beste Frequenzstabilität mit einer Linienbreite von nur 0,4 MHz (bei 100 μ s Messzeit) – und damit die schmalste Linienbreite, die bislang von DBR-Lasern dieser Wellenlänge erreicht wurde.

Publication

C. Pyrlík, N. Goossen-Schmidt, M. T. Hassan, A. Bawamia, J. Fricke, A. Knigge, A. Maaßdorf, M. Schiemangk, H. Wenzel, A. Wicht, "High Power Distributed Bragg Reflector Lasers at 689.45 nm for Quantum Technology Applications", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 34, no. 13, pp. 679-682, doi: 10.1109/LPT.2021.3139433 (2021).

Micro-integrated, crossed beam optical dipole trap for cold-atom-based quantum sensors

Atomic quantum technologies enable novel applications in timekeeping, networks, fundamental physics, and sensing. A transition from laboratory-based setups to applications in the field or on space platforms like small satellites requires a high degree of integration, miniaturization, and robustness under varying environmental conditions. In the Joint Lab Integrated Quantum Sensors, we develop compact atom-based measurement devices and specifically address the miniaturization of the physics package for timing and field sensing applications. The physics package consists of multiple key components, including atom source, ultra-high vacuum components and the surrounding optics system for atom manipulation, e.g., cooling, state preparation, trapping, and interrogation.

One established optical method for trapping, cooling and lensing of atomic ensembles is an optical dipole trap (ODT). Here, in crossed-beam configuration, two high-power laser beams are tightly focused and precisely overlapped to create a local potential minimum for neutral atoms. Realizing this trap configuration in the lab usually requires a large optical system (volume ~2–3 liters) and suffers from long-term stability issues, leading to a loss of alignment between the two beams and to the atom source.

A first micro-integrated, crossed beam optical dipole trap operating at 1064 nm, the μ XODT, is shown in Fig. 1. After passing a single-mode, polarization-maintaining fiber and a collimator, the beam of 1 mm diameter is split into two paths with perpendicular linear polarization. Subsequently, both paths are focused to a waist of 34 μ m radius and precisely overlapped, see Fig. 1. The system is assembled on a ceramic bench (36 x 43 mm²) with a volume of about 25 ml including optics. It can be operated with optical powers up to 2 W and exhibits no measurable alignment degradation when operated at up to 60 °C. Using micro-integration methods, a substantial miniaturization of the optical system and simultaneously a high passive stability is achieved.

The μ XODT is currently operated within a rubidium 87 cold-atom experiment. Integration of the optical system with the experiment is displayed in Fig. 2. The center aperture of the optical system gives clearance for one of the beams of the magneto-optical trap (MOT), a first stage to trap and cool atoms. Fig. 3 shows first absorption images of atoms trapped by the crossed beam ODT.

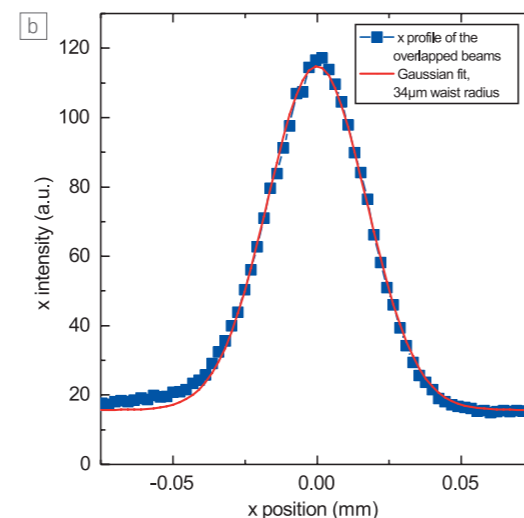
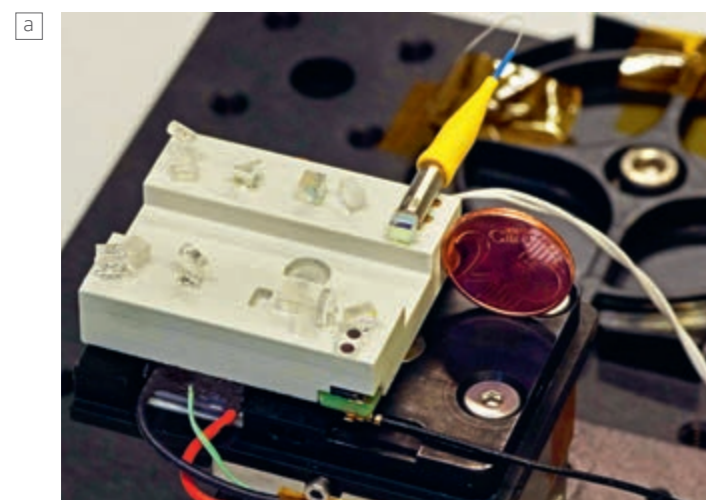
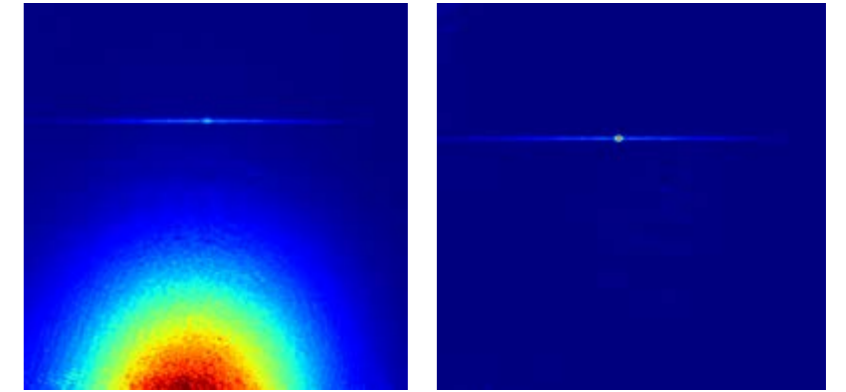


Fig. 1a): Micro-integrated, crossed beam optical dipole trap μ XODT operating at 1064 nm. The optical layout generates a crossed beam with a coinciding focus of 34 μ m waist radius and perpendicular polarization at a distance of 31 mm from the micro-optical bench. b): Intensity profile and Gaussian fit in the overlap point of both focused beams.

Fig. 3: Absorption image of the optical dipole trap operated with 1.4 W optical power, taken after 25 ms (left) and 1 s (right) holding time. The image plane is perpendicular to the plane defined by the two intersecting beams, and the trapped atoms have a lifetime of 1 minute. The left picture also shows the magneto-optical trap, while in the right picture only atoms in the dipole potential with a clear minimum at the intersection point are visible.



Further developments based on these results are the goal of the projects KACTUS-II and QCHIP, where the μ XODT will be interfaced with an atom chip. These chips enable the fast generation of ultra-cold atom ensembles by creating steep magnetic fields with high trapping frequencies, forming, e.g., chip-based Ioffe-Pritchard traps. In these projects, a micro-integrated electro-optical setup will be combined with the atom chip within the ultra-high vacuum (UHV) environment of the physics package. This approach keeps the compactness while enabling novel atom trapping configurations like purely optical or hybrid magneto-optical traps in the vicinity of the atom chip surface. However, this implies further requirements regarding the pointing stability and UHV compatibility of the miniaturized optical setups, which currently are addressed in our work.

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 50WM1648, 1949 and 50RK1978.

Atombasierte Quantentechnologien ermöglichen neue Anwendungen in Zeitmessung, Kommunikation, Grundlagenphysik und Sensorik. Laborgestützte Aufbauten zu Anwendungen im Feld oder auf Mikrogravitations-Plattformen zu überführen erfordert ein hohes Maß an Integration, Miniaturisierung und Robustheit unter wechselnden Umweltbedingungen. Im Joint Lab Integrated Quantum Sensors entwickeln wir kompakte, atombasierte Messtechnik und miniaturisieren insbesondere Optik- und Vakuumsysteme zur Integration kompakter, feldtauglicher Sensorköpfe.

Mittels Mikointegrationsverfahren haben wir ein optisches System zur Erzeugung einer gekreuzten optischen Dipolfalle deutlich miniaturisiert und gleichzeitig eine hohe passive Stabilität erreicht. In einem Experiment unseres Joint Labs mit kalten Atomen werden damit Atome gezielt gefangen und manipuliert. Dieses System entwickeln wir im Rahmen der Projekte KACTUS-II und QCHIP weiter, indem wir es mit einem Atomchip verbinden. Dies ermöglicht eine weitere Miniaturisierung des Systems und neuartige Atomfallen-Geometrien.

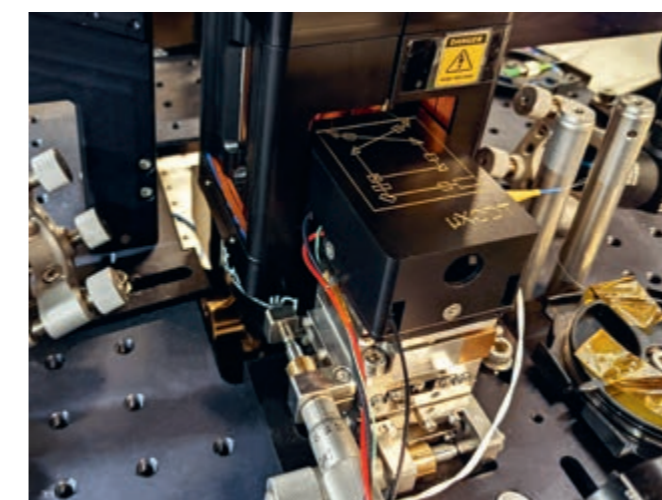


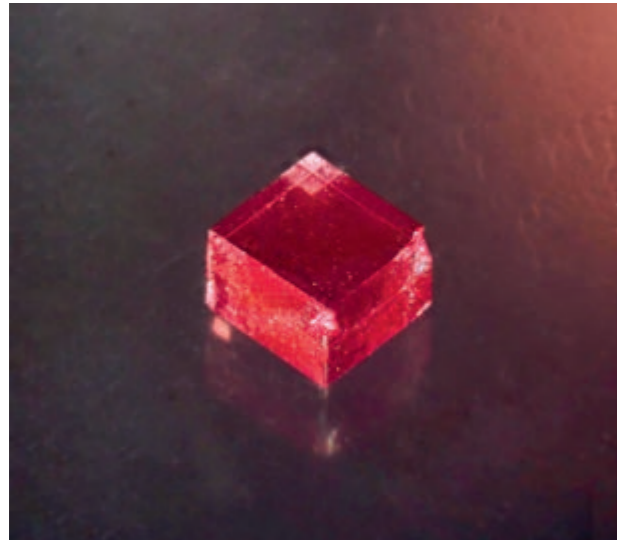
Fig. 2. The μ XODT integrated at the 3D cell of a 2D/3D magneto-optical trap setup operating with rubidium 87. Two translation and rotation stages are used to align the optical path to the glass cell. The center aperture in the optical system and lid gives clearance for one of the 780 nm MOT beams.

Publications

M. Christ, A. Kassner, R. Smol, A. Bawamia, H. Heine, W. Herr, A. Peters, M.C. Wurz, E.M. Rasel, M. Krutzik, "Integrated atomic quantum technologies in demanding environments: development and qualification of miniaturized optical setups and integration technologies for UHV and space operation", CEAS Space Journal, 11(4), 561–566, doi: 10.1007/s12567-019-00252-0 (2019).

S. Kanthak, M. Gebbe, M. Gersemann, S. Abend, E. M. Rasel, M. Krutzik, "Time-domain optics for atomic quantum matter", New J. Phys. 23 093002, doi: 10.1088/1367-2630/ac1285 (2021).

High-sensitivity magnetometry with ensembles of atomic defects in diamond



Enhanced diamond (HPHT-NV2). The intense red color is given by a high concentration of NV centers (approximately 3.3 ppm), which improves the sensing capability of the diamond when used as in the proposed method.

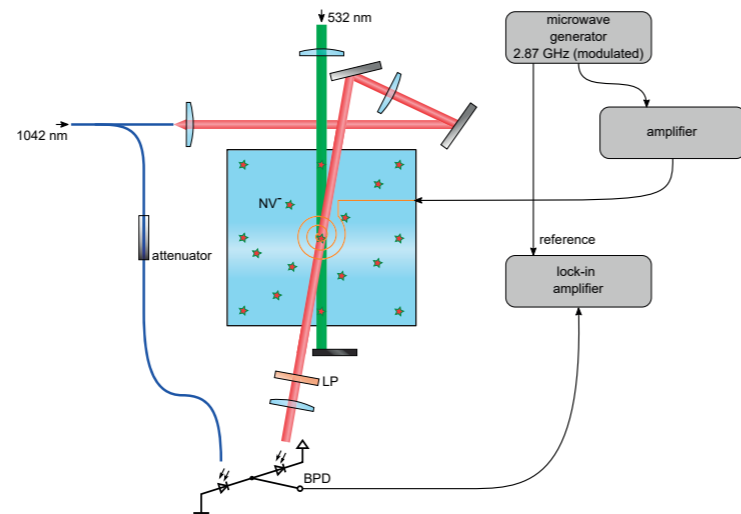


Fig. 1. Experimental setup. A green (532 nm) laser beam crosses a $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ diamond, containing ensembles of NV centers. A probing infrared (1042 nm) laser beam is aligned to intersect the green beam at the center of the crystal, while a microwave field is created by a coil located over the sensing volume. The residual infrared beam is measured employing a balanced photodetector (BPD). A lock-in amplification technique is used to improve the signal-to-noise ratio of the optical signal.

The sensing of weak magnetic fields is a requirement in several applications. In biomedicine, for example, very sensitive magnetometers are used to detect minuscule currents in the brain, heart, and muscles. The results of these measurements provide physicians with important information that aids in the diagnosis and research of several illnesses. The main characteristic of such magnetometers is the capacity to reach sensitivities in the order of $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, which is only possible with current state-of-the-art technologies. In the Joint Lab Diamond Nanophotonics, we are developing a sensor that is capable of providing the required sensitivity, a diamond magnetometer.

The core of the magnetometer is a synthetic diamond that contains a point defect called nitrogen-vacancy center (NV center). This defect is used as a transducer, converting the strength of a magnetic field into an optical signal. The system has been studied extensively in the last years and it has demonstrated its potential as a highly sensitive magnetic sensor. Despite its promising properties, the realization of such a magnetometer is challenging in several ways. One important aspect is the difficulty to collect the photoluminescent signal which contains the magnetic field's information. To overcome this problem, we have proposed an alternative principle and implemented in the current sensor. In this sensing scheme,

the magnetic-field-dependent absorption of infrared light of the NV center is measured and analyzed to read out the value of the magnetic field. The method is based on NV centers in a $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ diamond sample that are optically excited with a green laser (532 nm), while a microwave field ($\sim 2.87 \text{ GHz}$) is applied in parallel (Fig. 1). We have developed the microwave antenna design together with our Microwave Department. By sweeping the microwave frequency around the vicinity of the zero-field splitting of the ground state of the NV centers, their spectral response can be probed. At resonance, the absorption of an infrared laser beam at 1042 nm, which has been developed in our Optoelectronics Department, is maximal, and the detected laser intensity at the output of the diamond is minimal. This effect is visible in Fig. 2, where the derivative of the signal is shown. In the data, the lock-in signal at maximum slope (at 2.87 GHz) corresponds to the minimum transmission. The Zeeman effect produced by an external magnetic field shifts the resonant peak of the NV centers proportionally to the strength of the magnetic field, hence shifting the spectral position of the lock-in signal. Taking advantage of these properties, the NV center is used as a transducer that converts a magnetic signal into an optical. To mitigate laser and environmental noise, a balanced optical detection and lock-in amplification are applied.

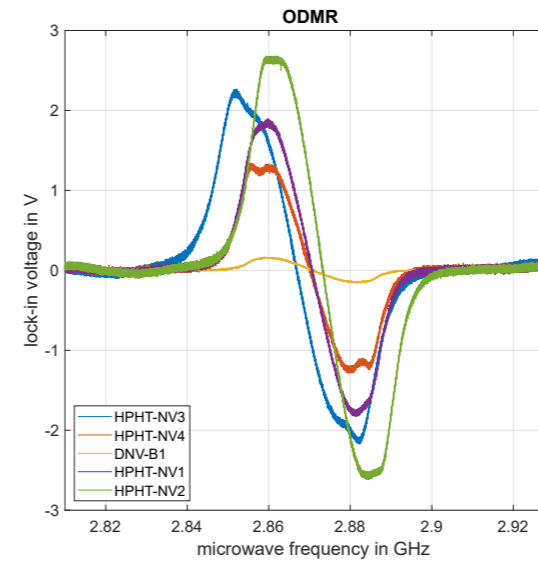


Fig. 2. Optically detected magnetic resonance (ODMR) from five different diamonds. The spectra are built from the lock-in signal, showing the derivative of the ODMR. Five diamonds with different content of NV centers were measured under zero external magnetic field. The slope of the curves at a frequency of 2.87 GHz correlates with the maximum sensitivity a sensor can provide. All the engineered diamonds perform better than a commercial-grade diamond (DNV-B1, yellow line).

Together with the precise generation of the microwave field and the stability of the infrared laser, the concentration of NV centers in the diamond plays a critical role in the sensor performance and has to be carefully engineered. We processed commercial, synthetic diamonds to increase the content of NV centers. This enhancement is done by exposing the diamonds to high energy electron irradiation (7 MeV) at four different fluences and subsequent annealing at 1100°C . The irradiation was carried out at the Leibniz Institute of Surface Engineering, and the annealing was done in collaboration with the Walter Schottky Institute, Technical University of Munich.

The experimental verification of the sensing principle is implemented by recording the IR-ODMR spectra of the diamonds and determining the magnetic resonance under a zero magnetic field. An example of the results is shown in Fig. 2, where the IR-ODMR signal is presented for five diamonds, each one containing a different concentration of NV centers. In all the cases, the resonance is located at a frequency of 2.87 GHz, which agrees with the theoretical value. The sensitivity of the sensor was measured to be less than $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ for the processed diamonds (Fig. 3), which is a first step towards reaching the required $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$. At this point, the project has succeeded in proving the

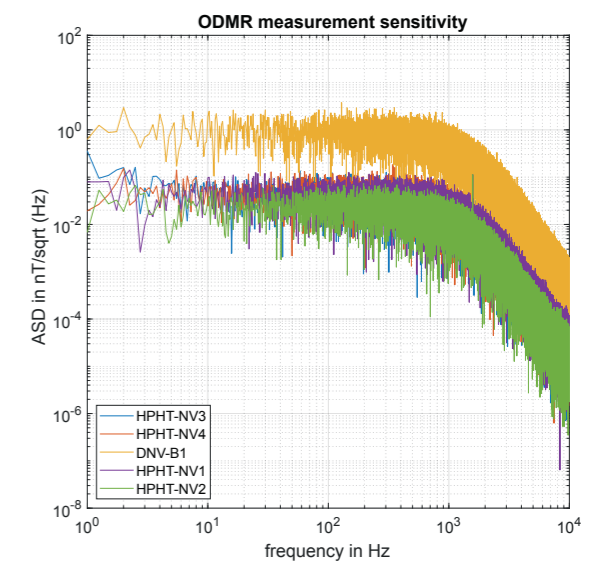


Fig. 3. Noise spectral density of the lock-in signal. All enhanced diamonds show a lower noise floor than the commercial one (DNV-B1, yellow line), which translates into an improvement of one order of magnitude on sensitivity.

concept of optical detection of magnetic resonance through the infrared absorption (IR-ODMR) of the nitrogen-vacancy center in diamond. We are continuing to improve the sensor sensitivity and are working on an integrated, compact design together with the Fraunhofer Heinrich Hertz Institute in parallel.

Die diamantbasierte Magnetometrie hat sich zu einer vielversprechenden Technologie entwickelt, mit der sich mikroskopische Magnetfelder hochsensitiv erfassen lassen. Mithilfe des Zeemann-Effektes wird ein magnetisches Signal an den im Diamanten enthaltenen Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NVC) in ein optisches umgewandelt. Für die Sensitivität sind die charakteristischen Eigenschaften des Diamanten besonders wichtig. In unserer Studie haben wir den Einfluss von unterschiedlichen NVC-Konzentrationen auf die Sensitivität untersucht. Dafür wurden vier Diamanten mit unterschiedlich erhöhter NVC-Konzentration prozessiert und die Ergebnisse mit denen herkömmlicher Konzentrationen verglichen. Als Resultat konnten wir die Messmethode demonstrieren sowie die Sensitivität unter Verwendung der Diamanten mit erhöhter NVC-Konzentration deutlich steigern.

Direct nanofabrication of on-chip nano-optical components

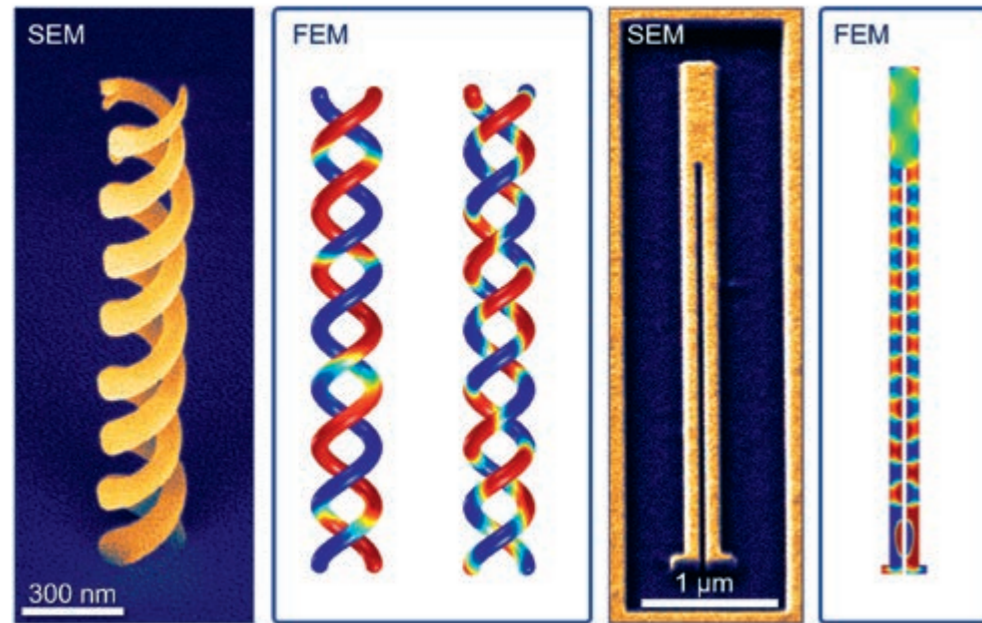


Fig 1. Scanning electron micrographs (SEM) of double helical antenna and 2-wire waveguide along with corresponding modelled surface charge distribution (FEM – finite element modeling) of antisymmetric mode patterns. The double helix was fabricated by direct electron beam writing, the 2-wire waveguide was engraved into a single crystalline gold layer using a focused Ga ion beam.

Beams of charged particles such as ions and electrons can be used not only for imaging purposes but also for direct material modification on the nanoscale. Ion beam impact can locally remove material in a mask-free process due to physical sputtering. The choice of ion species determines the most appropriate use cases. Light ions, for example, allow for maximum resolution (i.e., spot sizes smaller than 1 nm) and exceptionally large depths of field. However, the sputtering rate is low and the interaction volume is large, resulting in significant heat transfer into the substrate material. Therefore, He and Ne ion beams are ideal for patterning/modifying thin materials with the highest spatial resolution. In contrast, Ga ions have a much smaller interaction volume, a higher ablation rate but larger spot sizes. In addition to top-down patterning, bottom-up growth of the material is also possible. Local dissociation of precursor gases in the vacuum chamber of the microscope allows both ion and electron beams to be used for direct three-dimensional writing of nanostructures.

The underlying processes in direct writing are governed by collisions between the incident projectiles and atoms in the substrate,

as well as by complex local chemistry. Therefore, among other things, a material- and geometry-related optimization of the beam paths and parameters is required to achieve the desired patterning result. For this purpose, the Python-based patterning toolbox FIB-o-mat has been developed. FIB-o-mat has a fully documented modular structure, so it is easy to use and easy to extend. In its current version (<https://pypi.org/project/fibomat/>), it offers high-level pattern generation, low-level beam path generation and optimization as well as automation tools for ion and electron beam processing.

Applications of FIB-o-mat within our Joint Lab Photonic Quantum Technologies include direct writing of chiral nanoantennas for (circular) polarization control and extreme light localization (see Fig. 1). The antenna structure consists of a double helix written by a focused electron beam using a gold-containing precursor. A star-shaped beam path (similar to 3D printing, see Fig. 2) with beam dwell times adjusted to the locally changing precursor supply was created to ensure optimal growth rates and highest shape fidelity. This enabled us to realize double helical antennas with up to 4 turns and radii as small as 100 nm.

Such helical gold antennas support a variety of polarization-sensitive coupled plasmonic modes that feature an antisymmetric surface charge distribution. These modes allow for efficient coupling to antisymmetric modes in 2-wire plasmonic waveguides, as shown in Fig. 1, but also to a dipolar emitter. While coupling to waveguides enables conversion of highly focused chip-guided light to circularly polarized far-field radiation and vice versa, coupling to a quantum emitter and thus its polarization control is of fundamental interest.

The characterization of promising quantum emitter candidates to be coupled to on-chip optical components is performed in a self-built confocal epifluorescence setup realized in collaboration with the group of Prof. Arno Rauschenbeutel at Humboldt Universität zu Berlin.

This work is supported by the German Research Foundation (DFG) within the project 'chiralFEBID' under grant no. HO 5461/3-1. The ion beam patterning was performed in the Corelab Correlative Microscopy and Spectroscopy at Helmholtz-Zentrum Berlin. Furthermore, we would like to highlight our lead participation in the EU Cost Action CA 19140 'FIT4NANO'.

Metallische Nanostrukturen sind ein vielversprechender Ansatz für miniaturisierte optische Komponenten, da sie in ihren minimalen Abmessungen nicht durch das Beugungslimit begrenzt sind. So können beispielsweise Gold-Antennen mit Durchmessern unterhalb der Lichtwellenlänge die Polarisation von Licht auf der Nanoskala kontrollieren. Der hier vorgestellte chirale Polarisationswandler basiert auf einer Doppelhelix-Antenne, die an polarisationsempfindliche Wellenleiter gekoppelt ist. Die Grundfläche der darauf basierenden Prototypen kann kleiner als $1 \mu\text{m}^2$ sein.

Die Herstellung erfordert die vollständige Kontrolle der Geometrie in Verbindung mit den gewünschten Materialeigenschaften. Dafür eignet sich das direkte Schreiben mit Elektronen optimal. Während die fokussierten Elektronen minimale strukturelle Merkmale ermöglichen, erlaubt das direkte Schreiben den Zugang zu drei Dimensionen in einem einzigen Schritt. Kombiniert mit Ionenstrahl-basiertem Patterning können komplexe Bauteile in ein und derselben Vakuumkammer hergestellt werden. Numerische Simulationen und analytische Berechnungen bilden das Rückgrat des Device-Designs.

Publications

I. Utke, P. Swiderek, K. Höflich, K. Madajski, J. Jurczyk, P. Martinović, I. B. Szymańska, "Coordination and organometallic precursors of group 10 and 11: Focused electron beam induced deposition of metals and insight gained from chemical vapour deposition, atomic layer deposition, and fundamental surface and gas phase studies", *Coord. Chem. Rev.* 458 (2022).

V. Deinhart, L. 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.* 12, 304 - 318 (2021).

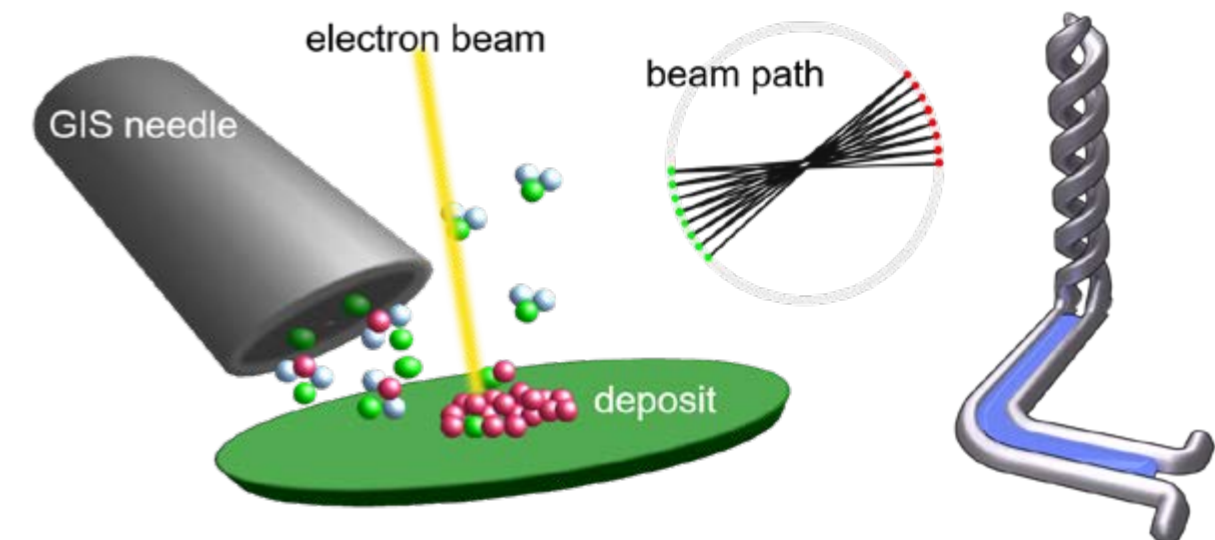


Fig 2. Schematic of the direct writing process using a focused electron beam. The electron beam decomposes the precursor gas supplied by the needle of a gas injection system (GIS). The beam path for the double helix was generated using the FIB-o-mat. An artistic sketch of the final polarization conversion device is shown on the right.

III-V Electronics

III/V-Elektronik

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

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

- > **Microwave power amplifiers based on GaN** for the use in space applications and base stations for mobile communications – the focus is on concepts improving energy efficiency (load and supply modulation, envelope tracking).
- > **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 300GHz (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 as well as a transferred-substrate process are 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.
- > **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-band-gap 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.

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:

- > **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 kommen ein Triple-Mesa- und ein Transfer-Substrat-Prozess zur Anwendung, der auch eine InP-auf-BiCMOS-Hetero-integration auf Waferebene beinhaltet. Damit können kompakte integrierte Frontend-Module für Radar-, Sensor- und Kommunikationssysteme realisiert werden.
 - > **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 dazu 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.

Digitizing 6G – sub-THz switch-mode circuits for highly efficient wireless communication systems

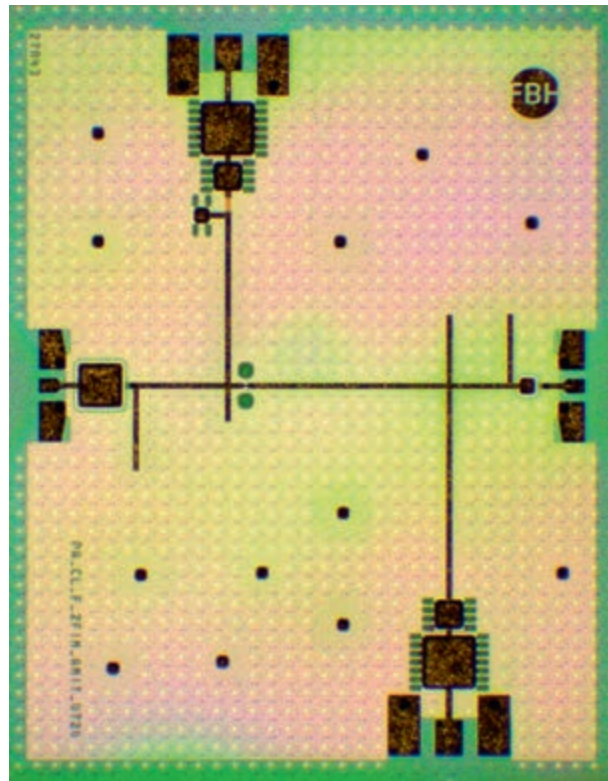


Fig. 1. Chip photo of a fabricated InP class-F-like W-band PA; area: 1.3 x 1.6 mm².

The W-band spectrum (75 ... 110 GHz) is gaining more and more attention. This is especially true for commercial, military and 6G applications that require wireless data transmission with high capacity and low-cost at the same time. The top priority for such systems is high output power, gain and bandwidth as well as proof-of-MIMO system operation and functionality with multi-element arrays at highest frequencies. However, the power-added efficiency (PAE) of the power amplifiers (PAs) is still a bottleneck. The PA is a major power dissipation contributor in the front-end, thus significantly affecting the overall efficiency.

Among different approaches for efficiency enhancement in PAs at mm-waves, switched-mode concepts like class-E/F seem to

be the most promising solution for W-band and beyond. However, it is a major challenge to fine-tune class-E/F networks for W-band. This can be attributed to significant parasitics and degrading accuracy of the models at the harmonics involved. Another important factor is proper modelling of the high current regime in the transistor's saturation region. At the same time, InP technology is the most promising candidate for both high efficiency and high output power requirements at W-band. It is therefore highly interesting to evaluate the potential of switch-mode W-band PA designs in terms of efficiency using FBH's 0.5 μ m InP-DHBT process line for the application in next-generation (6G) communication systems.

In 2021, we have presented the first single-stage class-F-like W-band power amplifier in InP-DHBT technology. The compact chip (1.3 x 1.6 mm²) reaches a maximum efficiency of 25.4% at 8.8 dBm output power for a collector voltage V_{cc} of 2.85 V and a base bias (V_b) of 0.87 V. However, the best trade-off between P_{out} (10.9 dBm) and PAE (24%) has been achieved for a slightly different bias point ($V_{cc} = 2.9$ V and $V_b = 0.9$ V). The measured saturated output power is 12.5 dBm. The proposed PA was also measured with several biasing conditions over a wider frequency range from 92 to 103 GHz with peak PAE between 23 and 25%, P_{out} between 9 and 12 dBm and 4–5 dB gain.

This PA achieved state-of-the-art results for InP-based switch-mode configurations around 100 GHz. Above 100 GHz, it reached the highest PAE so far. The performance obtained is promising and serves as a good starting point to develop further highly efficient switch-mode PA designs. These designs are supposed to significantly improve energy efficiency in future high-speed communication systems and will thus push the digitization of 6G.

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

Das W-Band-Spektrum (75 ... 110 GHz) rückt immer stärker in den Fokus der Aufmerksamkeit. Das gilt insbesondere für kommerzielle, militärische und 6G-Anwendungen für die drahtlose Datenübertragung mit hoher Kapazität und bei zugleich geringen Kosten. Für derartige Anwendungen ist die Effizienz der Leistungsverstärker jedoch noch immer zu gering – sie tragen wesentlich zu den Verlustleistungen im Front-End bei. Dies wiederum wirkt sich erheblich auf die Gesamteffizienz aus. Schaltverstärker-Konzepte wie etwa Klasse-E/F bieten die momentan beste Lösung für mehr Effizienz im W-Band und darüber hinaus. Sollen zugleich ein hoher Wirkungsgrad und eine hohe Ausgangsleistung über 100 GHz erreicht werden, ist die InP-Technologie der vielversprechendste Kandidat. Daher haben wir 2021 erstmals einen Klasse-F ähnlichen W-Band-Verstärker mit der instituteigenen InP-DHBT-Technologie realisiert. Der kompakte Chip (2 mm²) liefert eine maximale Ausgangsleistung von 12,5 dBm. Die höchste Effizienz erreicht er mit 25,4% bei 8,8 dBm Ausgangsleistung.

Diese Performanz ist ein guter Ausgangspunkt für weitere hocheffiziente Schaltverstärker-Designs. Diese werden die Energieeffizienz in zukünftigen Kommunikationssystemen, die hohe Geschwindigkeiten benötigen, deutlich verbessern und die Digitalisierung von 6G vorantreiben.

Publication

A. Shrestha, R. Doerner, H. Yacoub, T.K. Johansen, W. Heinrich, V. Krozer, M. Rudolph, A. Wentzel, "A 100 GHz Class-F-Like InP-DHBT PA with 25.4% PAE", Proceedings of the 16th European Microwave Integrated Conference (EuMIC), London, UK pp. 225 – 228 (2021).

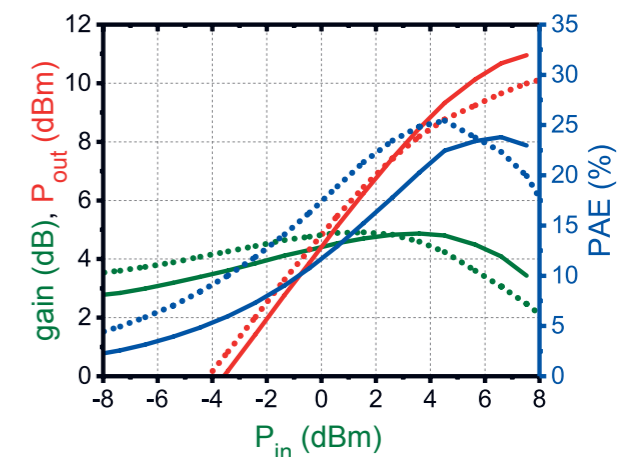
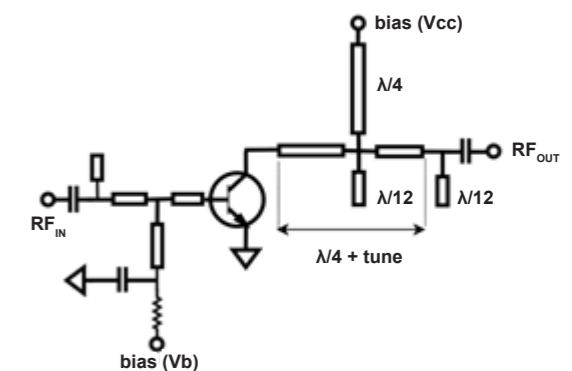


Fig. 2. Measured P_{out} , large-signal gain and PAE vs. P_{in} ; bias1: $V_{cc} = 2.9$ V, $V_b = 0.9$ V (solid lines), bias2: $V_{cc} = 2.85$ V, $V_b = 0.87$ V (dotted lines).



Schematic of class-F like 100 GHz power amplifier.

D-band chipset for 6G wireless communications

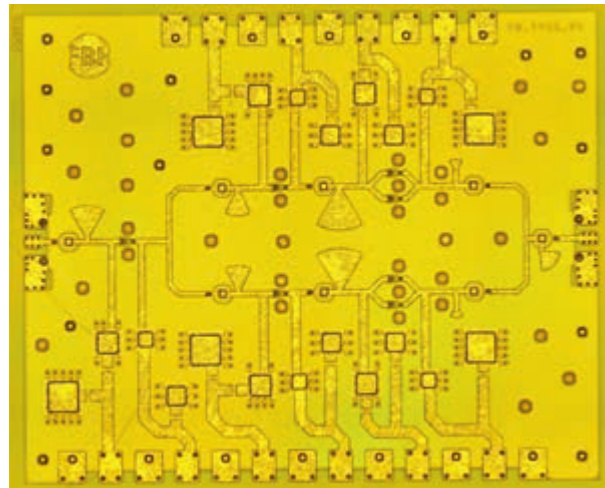


Fig. 1. Chip photograph of the medium power amplifier (1.5 x 1.2 mm²).

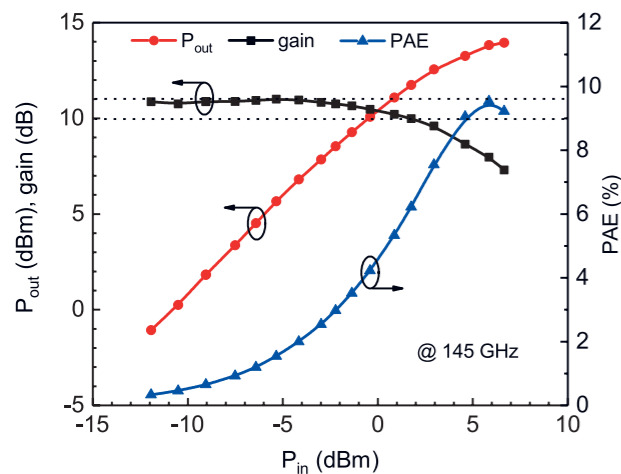


Fig. 2. Measured gain, output power and PAE versus input power at 145 GHz.

6G wireless communications will shape the future for high data rate systems. The frequencies that have already been identified for this purpose are in the D-band around 140–160 GHz. A large bandwidth is available in this frequency range, which can be used to satisfy the expected future high data rates and high throughput. A key challenge is to develop a chipset that is

based on a single technology which exhibits high output power levels, good linearity, and low noise performance. Using FBH's proprietary InP DHBT transferred substrate process meets this challenge with state-of-the-art MMICs. We have developed medium and high-power amplifiers for the 140–150 GHz range with output power levels reaching 18 dBm. Because of the limited gain at these frequencies, passive up-converters are inconvenient due to their high conversion losses. Therefore, active high conversion gain up-converters are desired, but are not widely available at these frequencies.

We have developed an up-converter achieving a single sideband (SSB) peak conversion gain of 18.5 dB at 146 GHz and > 10 dB in the frequency range 141–149 GHz. It reaches a high output 1-dB compression point (OP_{1dB}) of +5 dBm, which ensures a highly dynamic range of the communication system. The up-converter exhibits a saturated output power (P_{sat}) of +6.5 dBm at 145 GHz and offers an intermediate frequency (IF) bandwidth of more than 10 GHz in the V-band, at a DC consumption of only 25 mW. The high IF frequency allows to reuse existing and commercial wireless systems at mm-wave frequencies up to 60 GHz. The local oscillator (LO) input of the mixer operates from 96 to 110 GHz and requires an input power of 6 dBm.

D-band power amplifiers

A second key component for the D-band chipset is the power amplifier. We have developed a D-band power amplifier (PA) using our 0.8 μm InP-DHBT transferred-substrate MMIC technology. It consists of a driver stage with a 2-way combined cascade unit power cell employing 0.8 × 6 μm² single emitter devices. Measurements show a small signal gain of 12 dB. The output 1-dB compression point (OP_{1dB}) and the saturated output power (P_{sat}) occur around 13 dBm and 14 dBm, respectively. The maximum DC power consumption is 212 mW and results in a power-added efficiency (PAE) of up to 10% at 145 GHz.

D-band low-noise amplifiers

Low-noise receivers require ultra-low-noise amplifiers (LNA) as the first stage after the antenna. Many technologies are available for LNAs, but our InP DHBT transferred-substrate technology unites high robustness and low noise performance

and is therefore ideal for such applications. At D-band a low noise amplifier (LNA) using an 0.5 μm node of the InP-DHBT technology has been designed based on a 2-way combined cascade unit power cell. The measured LNA small-signal gain exhibits 10–16 dB and 11–8.5 dB noise figure (NF) in the frequency range 140–170 GHz. The DC power consumption is only 103 mW and results in a power-added efficiency (PAE) of 11% at 146 GHz. The output 1-dB compression point (OP_{1dB}) reaches 10 dBm at 146 GHz. The chip area is only 1.6 x 1.1 mm². These

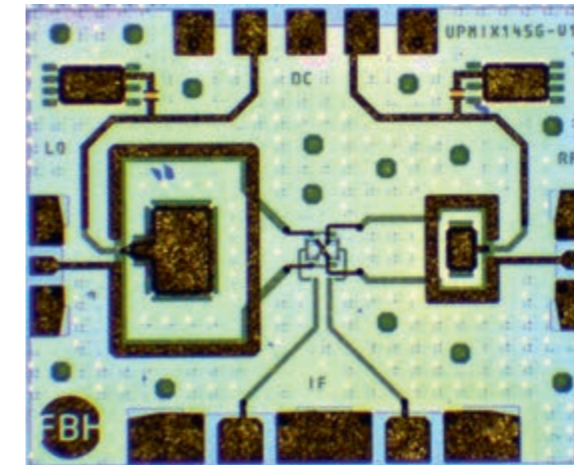


Fig. 3. Chip photograph of the up-converter mixer (1.0 x 0.8 mm²).

Die 6G drahtlose Kommunikation ist ein Herzstück zukünftiger Kommunikationssysteme für hohe Datenraten. Der vorgesehene Frequenzbereich für diese Systeme liegt zwischen 140–160 GHz und erlaubt hohe Bandbreiten sowie hohe Datenraten. Chipsets für derartige Systeme mit einer einzigen Technologie zu realisieren, ist von großer Bedeutung, da so Chip-Übergänge und damit Signalverluste bei hohen Frequenzen vermieden werden. Chip-Übergänge bei Frequenzen oberhalb von 100 GHz wirken sich kritisch auf das Betriebsverhalten der Komponenten aus. Am FBH haben wir unseren hauseigenen InP-DHBT Transfersubstrat-Prozess für ein entsprechendes Chipset bei 140–150 GHz verwendet. Mit diesem Prozess erzielen wir Ausgangsleistungen bis 18 dBm, Rauschzahlen von < 9 dB und Mischer mit Konversionsgewinn sowie hoher Sättigungsleistung und guter Linearität.

results demonstrate beyond state-of-the-art performance combination in terms of low NF, high linearity as well as PAE beyond 140 GHz.

This research was supported partially by the Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST), by the German BMBF within the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) framework under ref. 16FMD02 and with partial funding from the EU projects ULTRAWAVE and Teraway.

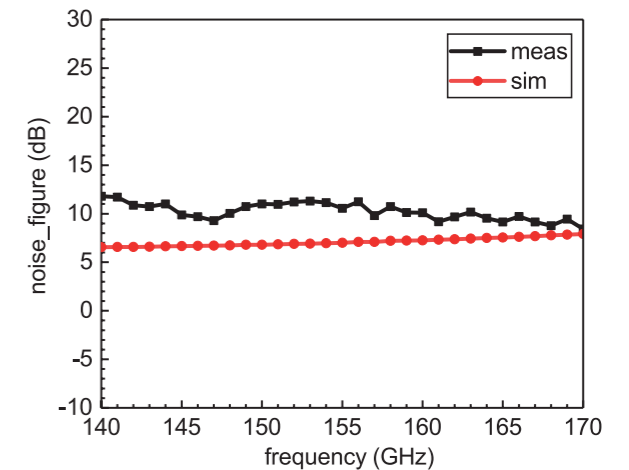


Fig. 4. Measured and simulated noise figure as a function of frequency.

Publications

M. Hossain, V. Krozer, T. Le, R. Bas, R. Letizia, E. Limiti, F. Magne, M. Marilier, A. Ramirez, J.M. Rao, G. Ullisse, B. Vidal, H. Yacoub, C. Paoloni, "D-band Transmission Hub for Point to MultiPoint Wireless Distribution", Proc. 50th European Microwave Conference (EuMC), Utrecht, Netherlands, pp. 157-160, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9337966 (2021).

M. Hossain, T. Shivan, M. Brahem, H. Yacoub, W. Heinrich, V. Krozer, "High Conversion Gain Up-Converter with +5 dBm OP_{1dB} in InP DHBT Technology for Ultra Capacity Wireless Applications", IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Atlanta, USA, ISBN 978-1-6654-0307-8, pp. 290-293 (2021).

C. Paoloni, R. Basu, M. Burhenn, M. Hossain, D. Huebsch, V. Krozer, T. Le, R. Letizia, E. Limiti, F. Magne, M. Marilier, A. Ramirez, J.M. Rao, G. Ullisse, B. Vidal, H. Yacoub, "Toward the first D-band Point to multipoint wireless system field test", Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Porto, Portugal, pp. 55-59, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482522 (2021).

C. Paoloni, V. Krozer, F. Magne, T. Le, M. Hossain, R. Basu, J. M. Rao, R. Letizia, E. Limiti, M. Marilier, G. Ullisse, A. Ramirez, B. Vidal, H. Yacoub, "Advancement in high capacity wireless distribution above 140 GHz", 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Tianjin, China, pp. 1-3, doi: 10.1109/UCMMT49983.2020.9295998 (2020).

T. Shivan, M. Hossain, R. Doerner, S. Schulz, T. Johansen, S. Boppel, W. Heinrich, V. Krozer, "A 175 GHz Bandwidth High Linearity Distributed Amplifier in 500 nm InP DHBT Technology", 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Boston, USA, pp. 1253-1256, doi: 10.1109/MWSYM.2019.8700895 (2019).

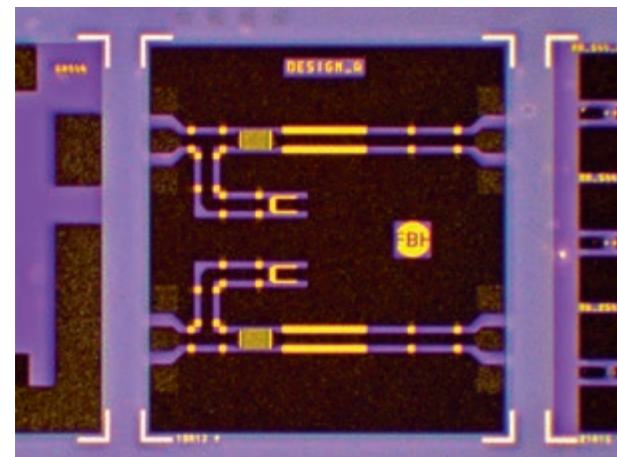
T. Shivan, M. Hossain, R. Doerner, S. Schulz, T. Johansen, S. Boppel, W. Heinrich, V. Krozer, "Highly linear 90–170 GHz SPDT Switch with High Isolation for Fully Integrated InP Transceivers", IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Boston, USA, pp. 1011-1014 (2019).

T. Shivan, M. Hossain, R. Doerner, T.K. Johansen, H. Yacoub, S. Boppel, W. Heinrich, V. Krozer, "Performance Analysis of a Low-Noise, Highly Linear Distributed Amplifier in 500-nm InP/InGaAs DHBT Technology", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 67, no. 12, pp. 5139-5147, doi: 10.1109/TMTT.2019.2947664 (2019).

Highly linear radar power detectors for medical sensing applications

Modern contactless sensors based on microwave technology have become indispensable in many medical and industrial application fields. Improved device performance, miniaturization of components and advanced integration have been the main drivers for this development. Among the radar technologies of choice, the interferometric six-port radar has attracted increased attention. It relies on fast diode detectors instead of active mixers, which together with a passive quadrature circuitry provide a complex IQ-signal. Phase measurements using this technique are highly accurate and can be used for different applications such as angle-of-arrival and displacement measurements.

Within the BMBF-funded iCampus project, the FBH develops detectors for a contactless medical radar together with BTU Cottbus-Senftenberg and TU Hamburg-Harburg. This radar is capable of monitoring vital sign parameters without requiring additional hardware connected to the patient. In fact, the project aims at extracting heartbeat, pulse wave and respiration rate of patients from low-power radar measurements both at home and in a clinical environment. The results can then be monitored remotely by the responsible physician. So far, unpredictable patient movements and highly varying signal strengths have been challenging the dynamic range of the used detector diodes and eventually limited the reliability of extracted vital sign parameters.



Detector MMIC with integrated GaN diode for radar in the ISM band around 24 GHz.

We have investigated several approaches to address these challenges. As a result, a software-based solution compatible to existing six-port sensing systems has been developed. It relies on a preceding calibration measurement, used to characterize the detectors' non-linearity. Based on two high-power tones with known phase relation and utilizing the interferometric nature of the sensing system, a set of correction coefficients for each diode detector can be obtained. The effectiveness of this method was quantified using an existing six-port radar, which was developed by the group of A. Kölpin at FAU Erlangen. It operates at 24 GHz and is based on Si Schottky diodes. Fig. 1 illustrates how intermodulation products introduced by the detectors' non-linearity at high input power can be effectively suppressed with applied linearization. As a consequence, the resulting IQ-constellation (as shown in Fig. 2) reverts to its ideally circular shape and enhances the phase accuracy and, in turn, the detection reliability of the vital sign parameters.

Besides addressing impairments from the detectors, we have also developed a method comprising a calibration procedure and a software algorithm to characterize and correct for phase and amplitude imbalances in the passive circuitry of the six-port as demonstrated in Figs. 3 and 4. Without such correction, the direct extraction of vital sign parameters from the complex IQ-data would be largely exacerbated. This method, when aided with circuit simulations has an advantage over other imbalance correction methods, as it allows to identify the origin of the imbalances. Thus, it provides valuable feedback to the RF designer.

As a further step, we addressed the hardware impairments, by using III-V-based diodes as radar detectors realized with our proven GaN and InP technology. In comparison to Si diodes, this technology offers higher breakdown voltages. Hence, the diode detectors may be operated at a higher local oscillator power, which allows for more flexibility when it comes to optimizing system performance towards high dynamic range.

This work has been funded by the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF) within the iCampus project, grant number 16ES1128K.

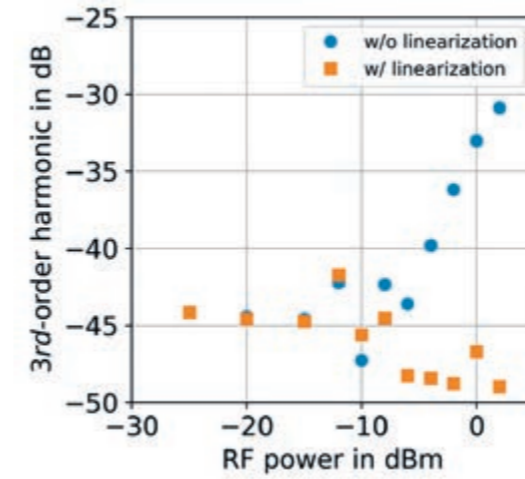


Fig. 1. Normalized 3rd-order intermodulation product vs. RF input power with and without applied digital correction.

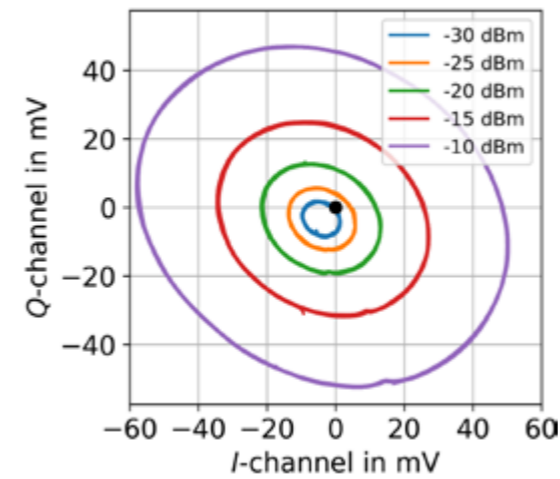


Fig. 3. IQ-constellation as measured for RF power levels ranging from -30 dBm to -10 dBm.

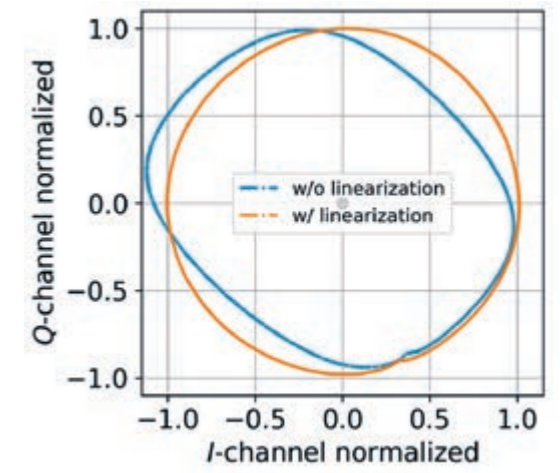


Fig. 2. IQ-constellation with and without correction method at high input power levels of LO: 2 dBm and RF: 2 dBm.

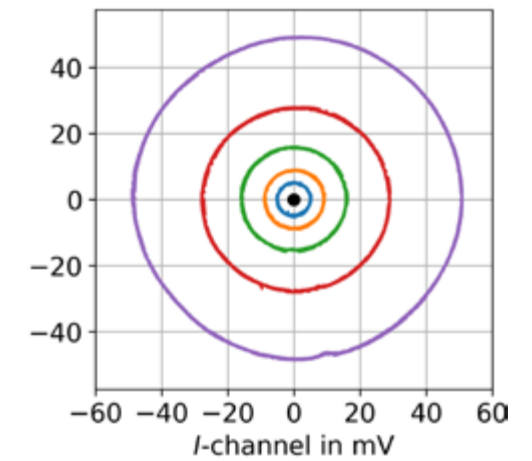


Fig. 4. IQ-constellation after phase and amplitude imbalance correction. The calibration was performed at a calibrated LO power of -2 dBm and an RF power of -30 dBm.

Im Rahmen des iCampus-Projektes sollen kompakte Radarsysteme entwickelt werden, mit denen sich die Herz-Kreislauf-Funktionen von Patienten berührungslos überwachen lassen. Relative Abstandsänderungen des Patienten sollen damit im Mikrometerbereich aufgelöst und Herz-Kreislauf-Parameter in Quasi-Echtzeit bestimmt werden. Exzellente Ergebnisse erzielt dabei das Sechs-Tor-Radar, das auf schnellen Diodendetektoren basiert. Unvorhersehbare Patientenbewegungen und stark schwankende Signalpegel beeinträchtigen jedoch die Zuverlässigkeit, da der Dynamikbereich der verwendeten Diodendetektoren begrenzt ist.

Am FBH arbeiten wir daher an neuen Ansätzen, um die Dynamik solcher Systeme zu verbessern. Wir haben digitale Algorithmen entwickelt, die auf Kalibriermessungen basieren und sowohl die Linearität der Detektoren deutlich steigern als auch den Einfluss von System-Unvollkommenheiten redu-

zieren. Diese Konzepte haben wir erfolgreich an einem Radarsystem bei 24 GHz demonstriert. Weiterhin untersuchen wir den Einsatz von Diodendetektoren auf der Basis von GaN- und InP-basierten Halbleitern.

Publications

S. Krause, F. Michler, A. Kölpin, M. Rudolph and W. Heinrich, "A Digital Correction Method for Increased Dynamic Range in Interferometric Six-Port Radars," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 8, pp. 997-1000, doi: 10.1109/LMWC.2021.3084338 (2021).

P. Manchanda, S. Krause, W. Heinrich, M. Rudolph, "Characteristics of Diode Detectors for Six-Port Radars," accepted for German Microwave Conference (GeMiC) Ulm, Germany (2022).

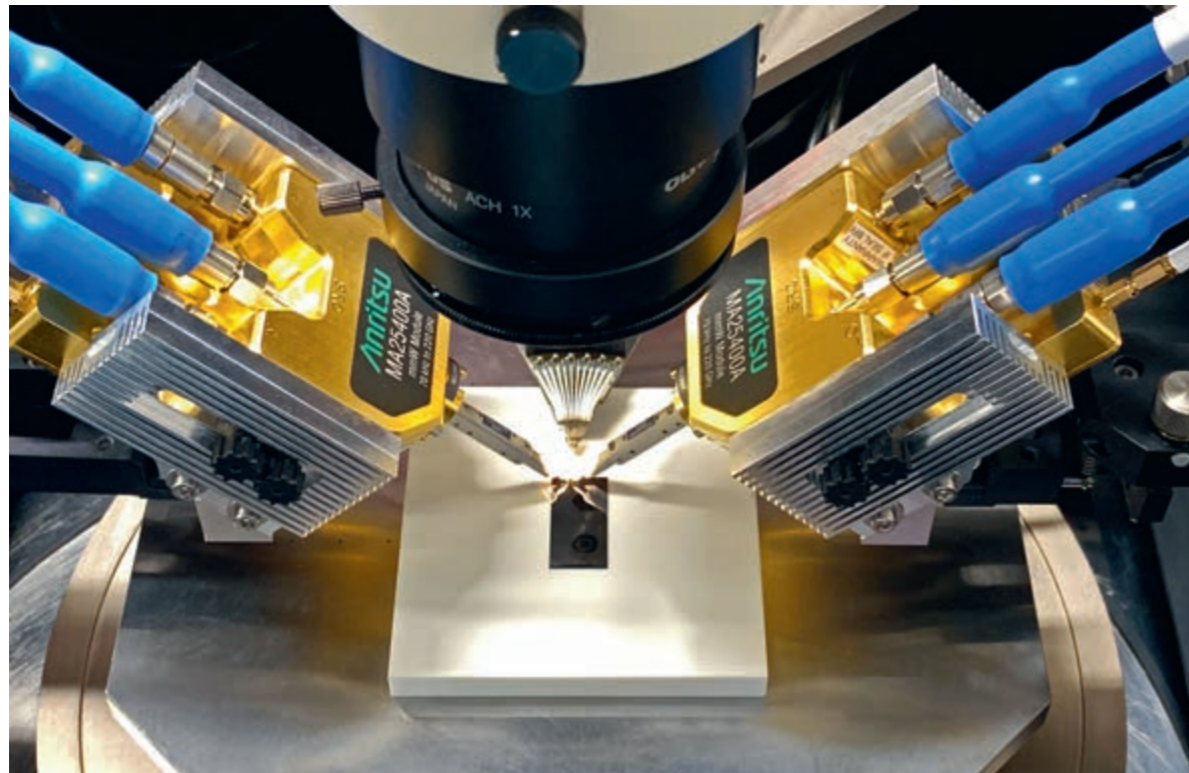


Fig. 1. Project-designed calibration substrate (black) placed on ceramic support (white). The two measurement probes contacting the substrate are directly mounted on the receiver modules, which are connected to the vector network analyzer (not shown). The microscope on top is employed to accurately position the measurement probes.

Accurate calibration of on-wafer measurements up to 220 GHz

The millimeter-wave and THz regions of the electromagnetic spectrum have become the subject of intensive research and development activities worldwide. Systems operating in this high frequency range will enable a variety of applications, such as radar sensing and imaging, high-capacity communications and high-accuracy positioning. These are used, for example, in 6th generation mobile networks (6G), for the Internet of Things (IoT), and Connected and Autonomous Vehicles (CAVs).

Development and production of components and integrated circuits for these systems need appropriate characterization methods and tools in the millimeter-wave and THz bands. Typically, scattering parameters are used for this purpose. It is often desirable to characterize the devices under test directly on the wafer, because this avoids time-consuming mounting steps and the measured data is not influenced by the chip packaging. For this purpose, wafers with the devices under test are placed on probing stations and dedicated probes are used to contact structures on the wafer, as can be seen in Fig. 1. The probes are attached to the receiver modules, which are connected via the blue coaxial cables to the vector network analyzer (not shown). These measured parameters are affected, for example, by attenuation and phase contribution of the cables or by re-

flections arising from the probe-wafer transition. Thus, the raw measurements need calibration techniques removing the parasitic effects of cables, probes and the measurement instrumentation from the true behavior of the device. The calibration techniques require the measurements of standards like reflections, resistors and lines with various length. Fig. 2 depicts such a set of calibration standards fabricated on a wafer. Based on the measured scattering parameters of these standards, the true, corrected scattering parameters of the device under test can be deduced.

Within the frame of the project TEMMT (Traceability for Electrical Measurements at Millimeter-wave and Terahertz frequencies for communications and electronics technologies) we are collaborating with sixteen European organizations, including the national metrology institutes LNE in France, METAS in Switzerland, NPL in the UK, VSL in the Netherlands, and PTB in Germany as well as three international organizations on the accurate calibration of on-wafer measurements up to 220 GHz. In a joint effort, on-wafer calibration structures are designed and fabricated. The wafers are distributed to the various partners for characterization. In this context, it is worth mentioning that FBH equipment is outstanding as it allows a characterization from

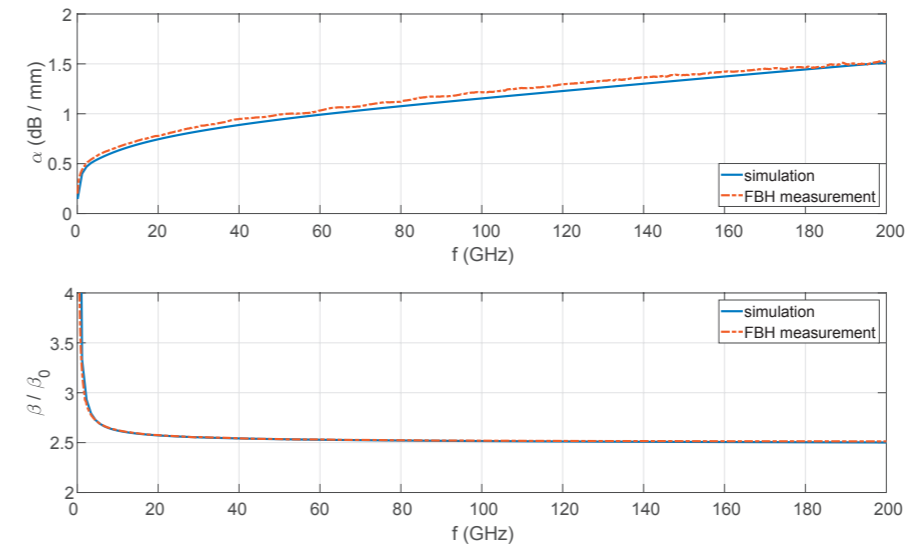


Fig. 3. Measured and simulated attenuation (top) and relative phase constant (bottom) of a coplanar waveguide on the wafer. Measurement and simulation show an excellent agreement.

100 MHz up to 220 GHz in a single step, i.e., without using different measurement hardware and possibly having gaps in frequency. Fig. 3 shows the comparison of measured and simulated line properties of a coplanar waveguide on the fabricated calibration wafer. In the near future, the measurements from all involved partners will be compared, and accuracy as well as reproducibility will be assessed. Furthermore, uncertainty budgets for the measurements will be specified. In this way, FBH contributes to the accurate characterization of devices and integrated circuits, which is an indispensable key for the upcoming generations of wireless systems.

The TEMMT project is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program.



Fig. 2. A set of on-wafer calibration standards: Structures on top and in the middle are reflect standards such as 'open' and 'short', whereas the elements at the bottom are lines with a defined length.

Der Millimeterwellen- und der THz-Bereich des elektromagnetischen Spektrums sind weltweit in den Fokus intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gerückt. Systeme, die in diesem Hochfrequenzbereich arbeiten, ermöglichen vielfältige Anwendungen wie etwa Radarerfassung und -bildung, Hochleistungskommunikation und hochgenaue Positionierung. Diese werden unter anderem in Mobilfunknetzen der 6. Generation (6G), für das Internet der Dinge (IoT) und vernetzte und autonome Fahrzeuge (CAVs) benötigt.

Um Komponenten und integrierte Schaltungen für diese Systeme zu entwickeln und zu fertigen, sind geeignete Charakterisierungsmethoden und -werkzeuge im Millimeterwellen- und THz-Band notwendig. Darauf zielt TEMMT – Traceability for Electrical Measurements at Millimeter-wave and Terahertz frequencies for communication and electronics technologies. In diesem Projekt arbeiten wir mit sechzehn europäischen Organisationen und drei internationalen Organisationen zusammen, um genaue Messverfahren bis 220 GHz zu etablieren. Unter anderem haben wir simulierte und gemessene Leitungseigenschaften eines koplanaren Wellenleiters auf einem Kalibrierwafer verglichen, der im Rahmen des Projektes entworfen wurde. Messung und Simulation stimmen im gesamten Frequenzbereich hervorragend überein.

Publications

G.N. Phung, F.J. Schmückle, R. Doerner, B. Kähne, T. Fritsch, U. Arz, W. Heinrich, "Influence of Microwave Probes on Calibrated On-Wafer Measurements", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 67, no. 5, pp. 1892-1900, doi: 10.1109/TMTT.2019.2903400 (2019).

G. N. Phung, U. Arz, K. Kuhlmann, R. Doerner, W. Heinrich, "Improved Modeling of Radiation Effects in Coplanar Waveguides with Finite Ground Width", Proc. 50th European Microwave Conference (EuMC 2020), pp. 404-407, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338133 (2021).

Low-loss flip-chip process for heterointegration of InP chips with BiCMOS

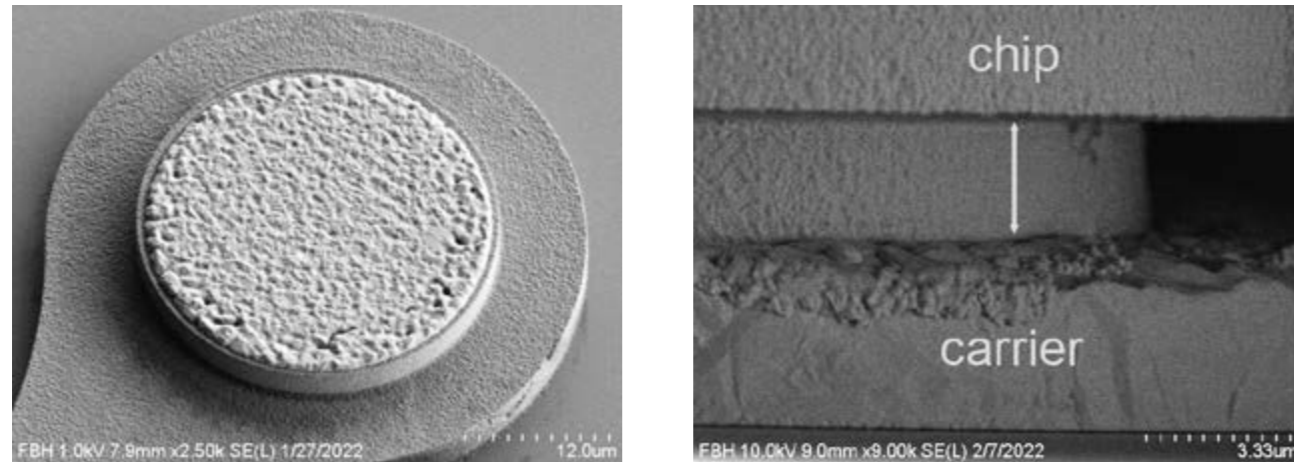


Fig.2. SEM image of the gold pillar with the indium solder (left), flipped chip on a carrier (right).

Developments in the field of mm-wave monolithic microwave integrated circuits (MMICs) are nowadays driven by high-speed wireless and optical communication as well as THz sensing and imaging applications. In many cases, these technologies demand relatively high output powers and energy efficiencies at frequencies well above 100GHz. Because RF-CMOS is limited in this regard, other technologies like indium phosphide (InP) hetero bipolar (HBT) and high-electron-mobility (HEMT) transistors, silicon germanium (SiGe) and even gallium nitride (GaN) HEMTs come into play. Since all these technologies have different strengths and weaknesses, low-loss RF transitions are regarded as one of the main targets for seamless hetero-integration of different III-V-based MMICs with CMOS and BiCMOS technologies.

For this reason, we have adopted a flip-chip approach to allow for minimal physical separation between the chip and the carrier, and thus minimizing the RF transition losses between the circuits. With the current placement accuracy of fine-placers, chip alignment errors in the range of 1 μm can be steadily achieved.

We chose indium as solder material because of its low melting point at around 157 $^{\circ}\text{C}$ and the low surface tension. To be able to accurately control the separation between chip and carrier, a gold pillar structure was incorporated on top of which the indium solder was deposited. A cross section of the flip-chip structure is depicted in Fig. 1. The pillars and the indium solder were processed using galvanic and electron-beam evaporation followed by lift-off.

A Ti-Pt under-bump metallization with a nitride sidewall passivation was used to limit the indium diffusion and protect the gold surface. A fabricated pillar can be seen in Fig. 2. The process utilizes i-line stepper lithography and is compatible to our in-house MMIC process. The influence of thermal stress on the device performance has been taken into account, which is why the process maintains a strict heat budget of less than 200 $^{\circ}\text{C}$. This temperature was chosen because little to no changes were observed in the active circuit components even during cyclic annealing.

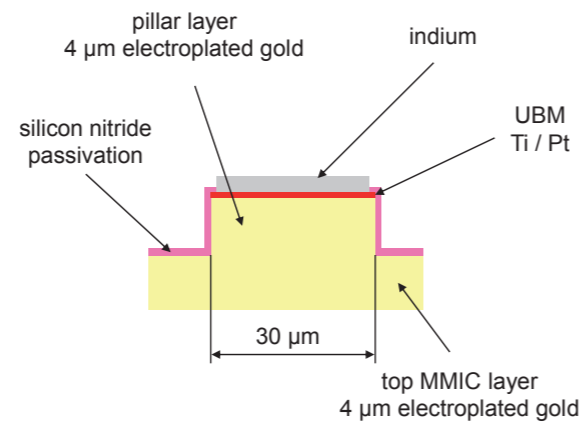


Fig. 1. Schematic cross section of the flip-chip bump structure.

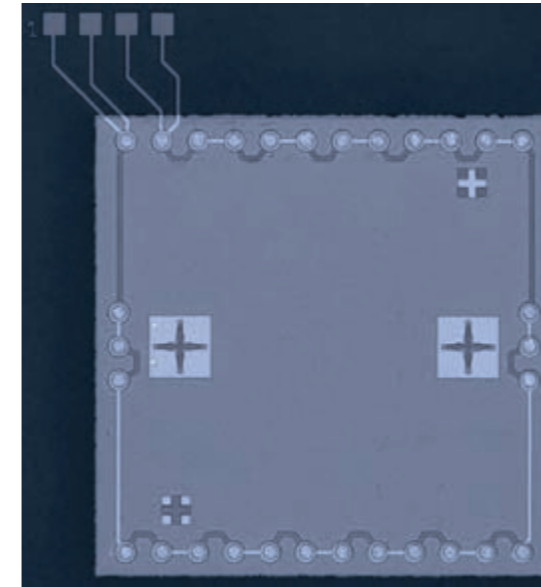
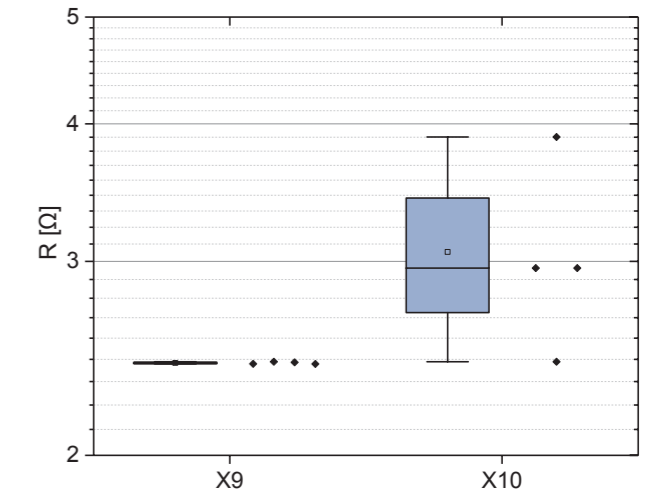


Fig.3. Aligned daisy chain test chip equipped with 4-wire contact points to measure the flip-chip resistance (left), total chain resistance of 30 consecutive flip-chip transitions including line resistance (right).



Electrical DC-measurements have been performed to test the electrical functionality of the bumps. A daisy chain structure with 30 bumps in series was used to test the yield of the bumping process. 4-wire measurements indicate a total chain resistance of approximately 2.5 Ω with high repeatability from wafer to wafer. RF measurements show input and output reflections at the bumps below -15 dB.

This wafer-scale flip-chip process facilitates heterointegration of InP circuits and sub-systems with various CMOS and BiCMOS applications as well as PCBs. The ease of this specially developed process and the low thermal budget of this approach makes it a perfect candidate for various III-V based MMIC processes. More details can be found on p.118.

This work was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the scope of the T-KOS project.

Wir haben eine Flip-Chip-Montagetechnologie bei niedrigen Temperaturen entwickelt, mit der sich Indiumphosphid-basierte Chips auf BiCMOS integrieren lassen. Bei Prozess-temperaturen von deutlich unter 200 $^{\circ}\text{C}$ können Chips mit begrenztem Temperaturbudget montiert werden ohne die Leistung der Bauelemente zu beeinträchtigen. Zwecks guter Skalierbarkeit, Wiederholbarkeit und Flexibilität in Bezug auf komplexe Übergänge verwenden wir einen selbstausrichtenden Ansatz. Dieser basiert auf galvanisch erzeugten Gold-Säulen, welche mit Indium in einem Standard Flip-Chip-Prozess mit den Pads des Trägerchips verlötet werden. Thermische Simulationen bestätigen, dass der Anstieg der thermischen Widerstände durch die Integration unkritisch ist. Weiter zeigen die so erzeugten HF-Übergänge äußerst geringe Verluste sowie eine Bandbreite von weit über 100 GHz – bereits ohne spezielle Übergangsoptimierung – bei gleichzeitig sehr hoher Reproduzierbarkeit.

Publication

M. Rausch, T. Flisgen, C. Stölmacker, A. Stranz, A. Thies, R. Doerner, H. Yacoub, W. Heinrich, "Technology for the Heterointegration of InP DHBT Chiplets on a SiGe BiCMOS Chip for mm-wave MMICs", accepted for publication, EUMW (2022).

Reducing contact and gate resistances – to optimize GaN mm-wave transistors

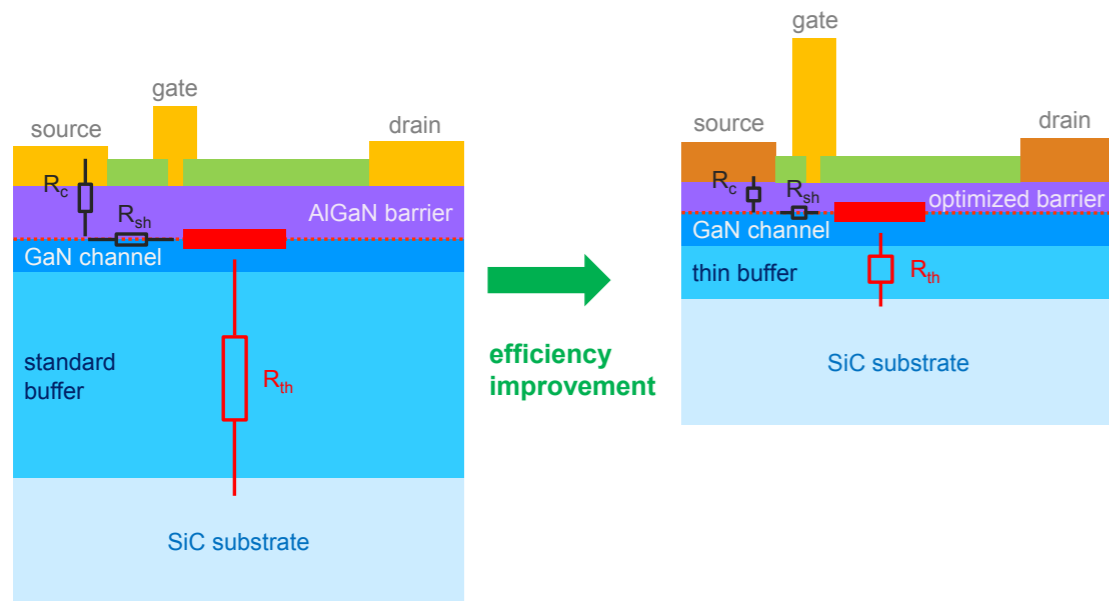


Fig. 1. Efficiency improvement scenarios in terms of optimizing device technology.

Ka-band GaN MMICs are important components for space applications as well as for commercial and military electronic systems. Our current 150 nm GaN heterojunction field-effect transistor (HFET) fabrication technology at FBH yields devices with the following features: maximum oscillation frequency f_{max} of about 150 GHz, cut-off frequency f_t of up to 50 GHz, and gain of up to 17.5 dB at 10 GHz. To push the limits of GaN devices, thus increasing switching frequency, output power density and noise performance, it is theoretically well-known to scale down the size of the transistors and/or lower their parasitic capacitances/resistances. Fig. 1 shows the key parasitic resistive elements, which may adversely affect the transistor characteristics and open up approaches to improve efficiency by optimizing the fabrication technology. The microwave performance is highly dependent on contact resistance R_c , gate resistance R_g and gate-source/drain capacitance C_{gs}/C_{gd} . Therefore, we are focused on reducing the ohmic contact resistance and the series resistance of the gate to boost GaN HFETs microwave properties.

Reducing the ohmic contact resistance

Low contact resistance is essential for high switching frequency and low noise performance of the devices. The current FBH technology offers 0.3 - 0.6 Ω mm contact resistance with 160 nm edge acuity. This would be critical for further downscaling the gate-to-source distance to $\leq 0.25 \mu\text{m}$. Therefore, we improved the ohmic contact properties by introducing a new metal stack [1]. Ta/Al/W ohmic contacts have shown stable contact resistance of 0.3 Ω mm with a significantly reduced contact edge roughness of 16 nm. This already resulted in a statistically relevant average improvement of the maximum output power and PAE of transistors by 0.2 W/mm and 5.0 % respectively, without additionally modifying the transistor cells. To further reduce R_c , we have recently started to develop a new technique that involves implantation in the active area underneath the ohmic contacts in drain and source. By shallow Ge ion implantation and capped annealing using pulsed rapid thermal annealing, we are expecting to reduce the contact resistance below $\leq 0.1 \Omega$ mm.

Reducing the gate resistance

Due to its significant impact on gate electrode losses, a consequently lowered serial gate resistance without significant increase of stray capacitances enables higher gain, higher f_{max} , and lower noise figure. Therefore, this allows for new transistor cell architectures with a wider gate finger. A reduction of R_g can be achieved by increasing the cross-sectional area of the gate head metallization. In order to achieve that, we have increased our gate module height from 380 nm to about 800 nm by applying an electroplated Au metallization. The ability of creating electro-plated gate heads bases on the specific Ir-sputter gate technology established at FBH. During processing, the Ir layer acts as a plating base that will be removed after gate definition. A specially developed resist profile allows for electroplating in a sulfidic-electrolyte. Fig. 3 shows the top and cross-sectional views of such an electroplated gate with 150 nm gate length and a gate head length of 500 nm.

The activities are funded in the frame of the ESA project "Kassiopeia" ESA ITT AO/1-10215/20/NL/CLP.

Galliumnitrid-basierte Millimeterwellen-Transistoren sind zentrale Komponenten für die verschiedensten elektronischen Systeme, die sich permanent weiterentwickeln. Die Mikrowelleneigenschaften von GaN-basierten Heterojunction-Feldeffekt-Transistoren (HEFTs) lassen sich stark verbessern, wenn resistive und kapazitive Verluste reduziert und die Wärmekopplung zum Substrat optimiert werden. Um dies zu erreichen, zielen unsere Arbeiten insbesondere auf die folgenden Eigenschaften: Verringern des Source- und Drain-Kontaktwiderstands, geringere Streuung über den Wafer, Verbesserung von Kontaktwiderstand und Kantenrauigkeit der Ohmkontakte und deutliche Reduktion des seriellen Gatewiderstands. Diese Optimierungen führen zu leistungstärkeren, effizienten mm-Wellen-Zellen. Sie eröffnen zudem die Möglichkeit, die Leistungsdichte von Transistorzellen und ihre Effizienz gezielt weiter zu erhöhen.

Publication

[1] H. Yazdani, S. Chevtchenko, F. Brunner, G. Tränkle, J. Würfl, "Au-Free Ohmic Contact for GaN High-Electron-Mobility Transistors", phys. stat. sol (a), vol. 219, no. 8, pp. 2100802, doi: 10.1002/pssa.202100802 (2022).

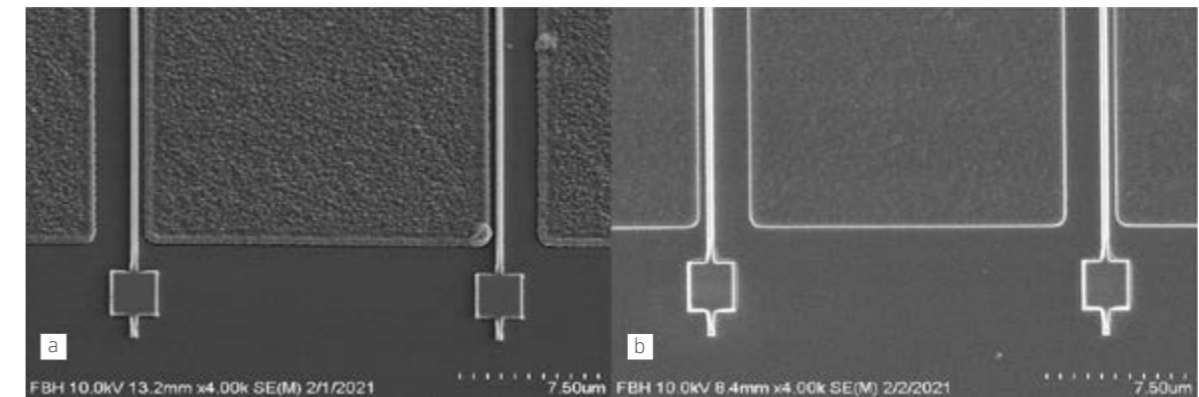


Fig. 2. Comparison of edge definition in a) current technology and b) developed Au-free contacts.

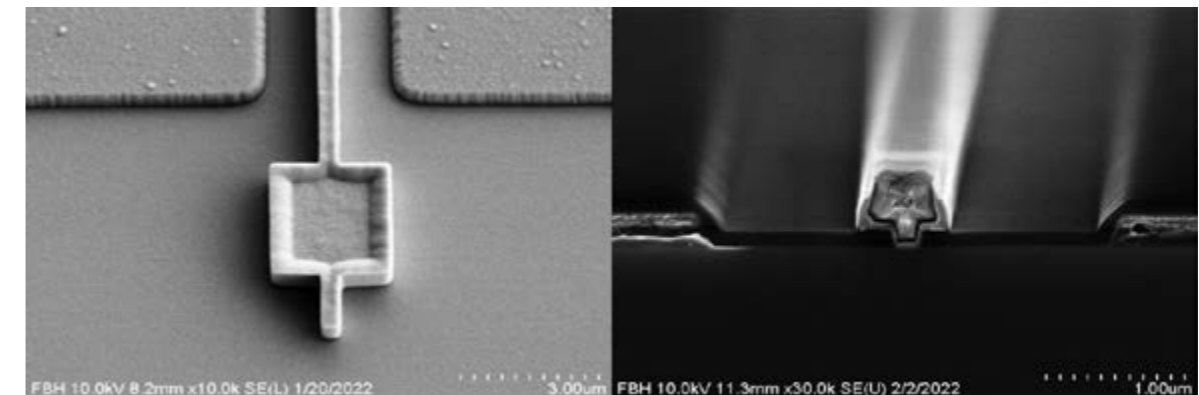


Fig. 3. Scanning electron microscope (SEM) images of fabricated tall gate.

SnO/ β -Ga₂O₃ heterojunction field-effect transistors for high voltage switching applications

Beta gallium oxide (β -Ga₂O₃) with its ultra-wide bandgap of 4.8 eV has emerged as a promising semiconducting material for the fabrication of next-generation power electronic devices. The estimated dielectric strength of 8 MV/cm combined with the anticipated Baliga's figure of merit are promising indicators. They are therefore expected to pave the way for power devices with even higher breakdown voltages and efficiencies than their SiC and GaN counterparts. So far, several studies have demonstrated the successful fabrication of power transistors based on β -Ga₂O₃. These devices have already verified the high potential for high voltage applications, reaching a peak field strength as high as 5.5 MV/cm and breakdown voltages above 3 kV. However, these values are still well below the expected theoretical limit of β -Ga₂O₃. In this regard, one major obstacle is the lack of p-type β -Ga₂O₃, which could significantly improve the overall performance by a more optimized trade-off between on-resistance and breakdown voltage. A possible solution to solve this issue is the realization of p-n heterojunctions by integrating n-type β -Ga₂O₃ with other p-type semiconductors.

In collaboration with Leibniz-Institut für Kristallzüchtung and Paul-Drude-Institut, FBH has started activities in the realization of heterojunction field-effect transistors (HJ-FET) based

on p-type SnO and n-type β -Ga₂O₃. A two-dimensional schematic of the SnO/ β -Ga₂O₃ HJ-FET structure is shown in Fig. 1a. Device fabrication was carried out using i-line stepper lithography on (100) β -Ga₂O₃ epitaxial wafers with dimensions of $10 \times 10 \times 0.5$ mm³. Furthermore, molecular beam epitaxy was used to deposit the SnO layer. The HJ-FET has a gate-to-drain distance L_{GD} of 4 μ m at a gate-to-source separation L_{GS} of 1 μ m as well as a gate length L_G and width of 700 nm and 250 μ m, respectively. Fig. 1b shows a TEM cross section of the gate topology including the SnO/ β -Ga₂O₃ heterojunction of a fully processed HJ-FET.

Representative transfer and output curves of a SnO/ β -Ga₂O₃ HJ-FET are presented in Fig. 2. The device exhibits an on-resistance of 50 Ω mm, which equals a specific on-resistance of 3.15 m Ω cm² and a maximum drain current of 100 mA/mm at a gate voltage of 0 V. The transfer curve indicates stable switching properties of the device with an on/off-current ratio of 10⁶. Furthermore, a three-terminal off-state breakdown measurement of the SnO/ β -Ga₂O₃ HJ-FET was carried out in ambient air. The gate and drain leakage currents measured at $V_G = -12$ V are presented in Fig. 3, showing a soft breakdown at 750 V followed by the catastrophic breakdown of the device at 870 V. Thus, the average breakdown strength yields a value of approx-

imately 1.9 MV/cm. By taking the breakdown voltage and the specific on-resistance into account, a high power figure of merit of 178 MW/cm² is calculated. This value is a promising outcome of our investigations, emphasizing the high potential of this heterojunction approach for the realization of 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 within the frame of the joint research project OXIKON, funding no. 03VP03711, and the Research Project GoNext no. 16ES1084K funded within Research Fab Microelectronics Germany (FMD).

Die Anforderungen an die Spannungsfestigkeiten von elektronischen Bauteilen in der Leistungselektronik steigen. Daher befassen wir uns intensiv mit neuen Halbleitermaterialien, die diesen Anforderungen gerecht werden könnten. Dazu zählt der vielversprechende Halbleiter Galliumoxid (Ga₂O₃). Er zeichnet sich durch eine sehr weite Bandlücke von etwa 4,8 eV aus, die eine hohe Durchschlagfestigkeit mit Werten weit über denen von Galliumnitrid oder Siliziumcarbid ergibt. Die bisher erreichten Leistungseigenschaften von Schalttransistoren auf der Basis von Ga₂O₃ liegen jedoch noch weit unterhalb der theoretischen Grenze. Ein großes Problem stellt dabei das Fehlen von p-leitendem Ga₂O₃ dar. Durch einen robusteren Transistoraufbau ließen sich damit höhere Leistungseigenschaften erreichen. Daher haben wir erstmalig Sperrschicht-Feldeffekttransistoren mit einer p-SnO/n-Ga₂O₃-Heterostruktur hergestellt und charakterisiert. In ersten Versuchen konnten wir bereits Leistungsdichten von 178 MW/cm² demonstrieren – und somit das hohe Potential solcher Heterostrukturen für zukünftige leistungselektronische Anwendungen zeigen.

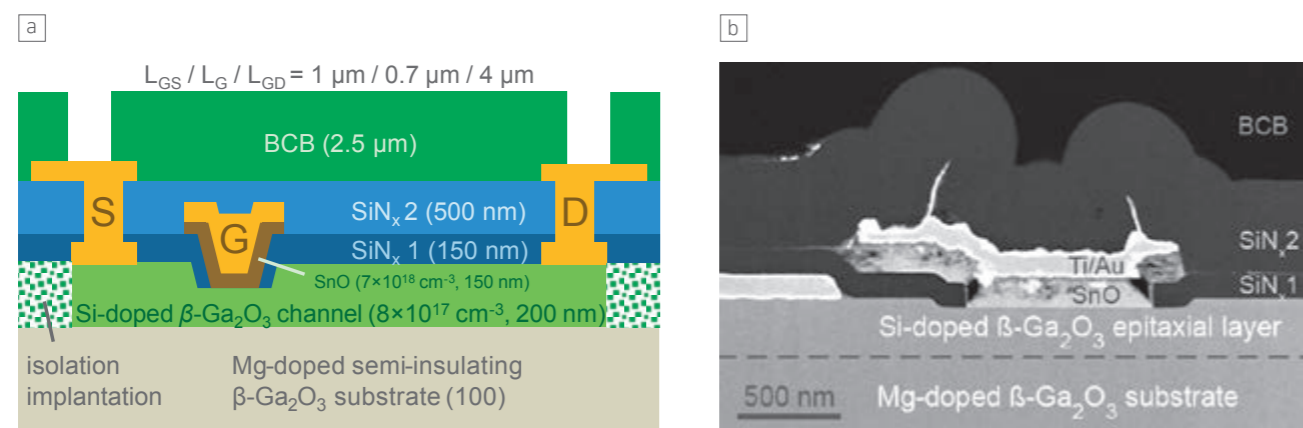


Fig. 1. a) Schematic cross section of the SnO/ β -Ga₂O₃ HJ-FET and b) TEM image showing the recessed gate topology including the SnO/ β -Ga₂O₃ heterojunction.

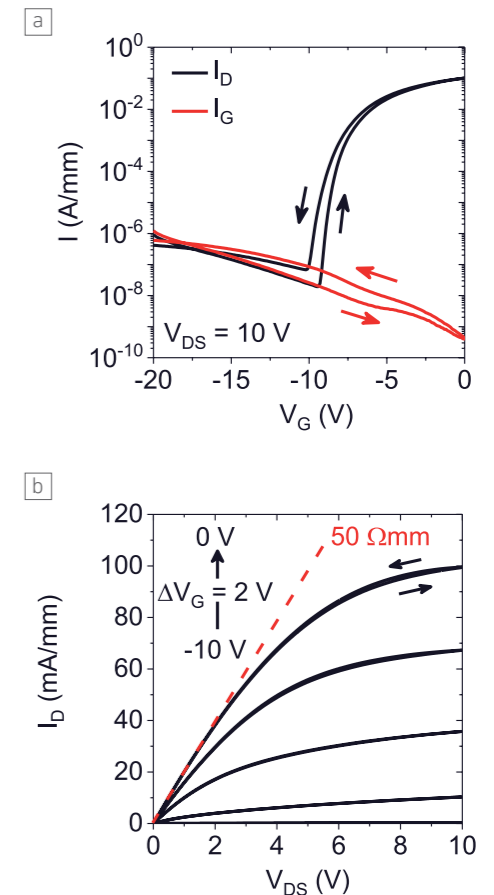


Fig. 2. a) Transfer and b) output characteristics of the fabricated SnO/ β -Ga₂O₃ HJ-FET with L_{GD} of 4 μ m.

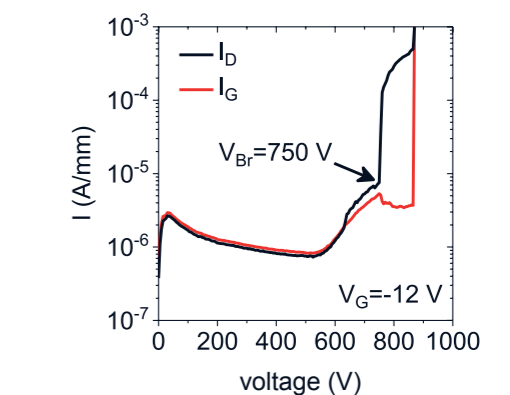


Fig. 3. Three terminal off-state breakdown measurement of the SnO/ β -Ga₂O₃ HJ-FET with L_{GD} of 4 μ m showing a soft-breakdown at 750 V and a catastrophic breakdown at 870 V.

Publication

K. Tetzner, K. Egbo, M. Klupsch, R.-S. Unger, A. Popp, T.-S. Chou, S. Bin Anooz, Z. Galazka, A. Trampert, O. Bierwagen, J. Würfl, "SnO/ β -Ga₂O₃ heterojunction field-effect transistors and vertical p-n diodes", Appl. Phys. Lett. 120, 112110 (2022).

AlN-based platform for high-voltage switching and for mm-wave amplification

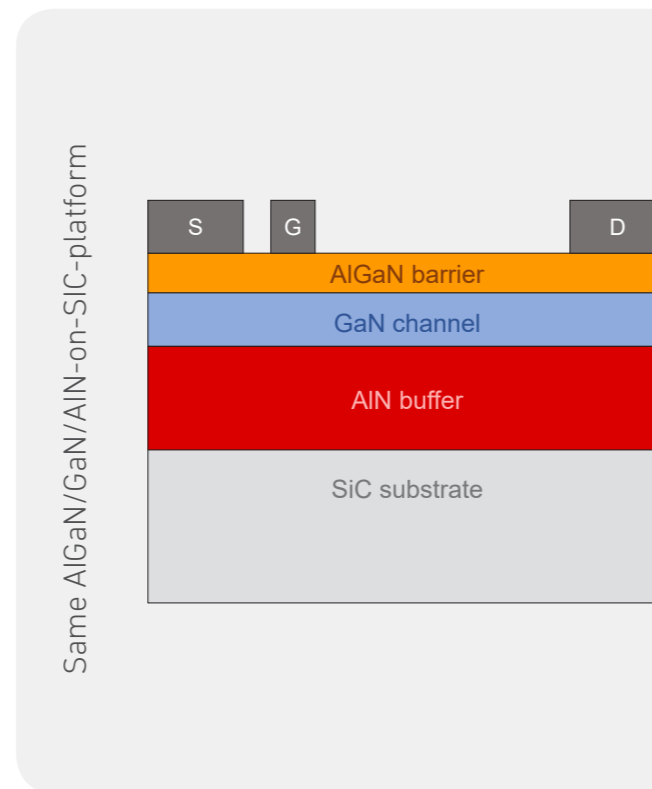


Fig. 1. AlGaIn/GaN/AlN-on-SiC platform used for both the RF and the HV process.

Lateral GaN-based transistors (HEMTs) are used for radio frequency (RF) amplification up to mm-wave frequencies as well as for high-voltage (HV) switching in power-electronic applications up to 650V. For both applications, however, the device performances have not yet reached the theoretical GaN material limits. One major cause can be found in the design of the semiconductor material stack, consisting of a compensation-doped GaN buffer, a GaN channel layer and an AlGaIn barrier layer. An insufficient back barrier of the GaN buffer beneath the GaN channel leads to parasitic conduction for the closed transistors. As a consequence, the blocking voltage for HV switching transistors and output power for RF transistors are reduced. GaN buffer compensation doping with either iron for RF devices or carbon for HV devices is introduced as remedy. But both dopants create defect states in the GaN buffer bandgap, and their charging kinetics is the origin for dispersion effects under dynamic transistor operation. These effects manifest themselves as knee walkout and drain lag in RF devices or as increased dynamic on-state resistance for HV switches.

We therefore explore the benefits of the ultra-wide bandgap material aluminum nitride (AlN) as buffer material without any

compensation doping. AlN generates a high back-barrier to the GaN channel of more than 2eV. The GaN channel is well confined without any buffer compensation doping, and related dispersion effects should be absent. This well confined GaN channel layer is key for realizing breakdown voltages close to the GaN material limit for the HV devices and to avoid punch-through effects even for gate lengths as short as 150nm as needed for mm-wave amplifying devices. Hence, the same AlGaIn/GaN/AlN semiconductor stack grown on top of 4" SiC substrates was used to realize both high-voltage switching transistors and mm-wave transistors for 30GHz amplification.

For HV device processing 700nm long gates are used, and the device structures are encapsulated in benzocyclobuten (BCB) to enable sufficient breakdown strength. The breakdown voltage scaling with gate-drain separation is 140V/ μm , which is 20% higher than for conventional GaN transistors. The observed 1790V breakdown voltage and $3 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$ area-specific on-state resistance result in a power figure-of-merit of 2.4GW/ cm^2 . This is superior to conventional GaN device technologies using GaN-based buffer layers. Power switches with 110m Ω /1200V rating were realized and kilowatt-range power-switching func-

Fig. 2. High-voltage (HV) process based on the common epi-technology platform. a) transistor cell with 700 nm gate length, b) HV layout on 4" AlN-on-SiC wafer, c) 120 m Ω transistor.

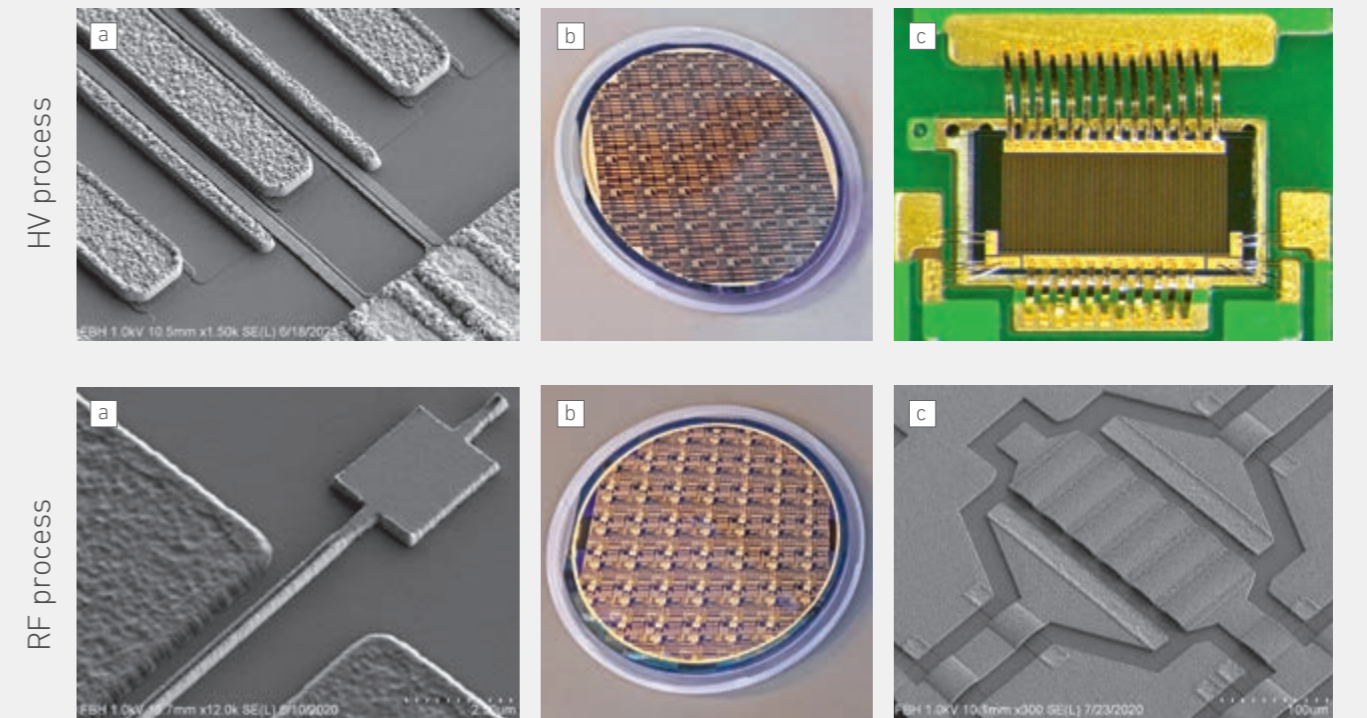


Fig. 3. Radio frequency (RF) process utilizing the common epi-technology platform. a) transistor cell with 150 nm gate length, b) mm-wave layout on 4" AlN-on-SiC wafer, c) 12 x 75 μm mm-wave transistor cell.

tionality is demonstrated for the new AlN-based device, yielding 950V/10A switching transients. The mm-wave transistor process technology is based on 150nm long gates and feature air bridges in the power signal lines to minimize dielectric losses. An output power density of 2.2W/mm with an PAE of 25% was reached at 30GHz for 28 V drain bias. 3.4W/mm were achieved at 10GHz when applying 35 V drain bias. The observed continuous increase of the output power with the drain bias up to 35V is a direct consequence of the high back barrier of the introduced AlN buffer layer.

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

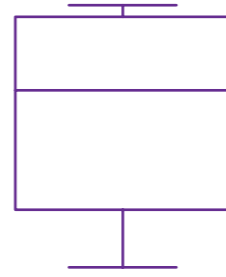
Publication

O. Hilt, F. Brunner, E. Bahat Treidel, M. Wolf and J. Würfl, "GaN-channel HEMTs with AlN buffer for high-voltage switching", 79th Device Research Conference (DRC 2021), Santa Barbara, USA, doi: 10.1109/DRC52342.2021.9467164, (2021).

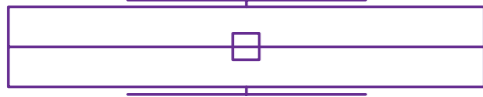
Laterale GaN-Transistoren werden als Hochfrequenzverstärker und Hochspannungsschalter eingesetzt. In beiden Anwendungsfeldern haben sie jedoch ihre Leistungsgrenzen noch nicht erreicht, die durch die GaN-Materialeigenschaften vorgegeben sind. Dies liegt hauptsächlich an der unzureichenden Eingrenzung des Stromleitungspfads auf die GaN-Kanal-Halbleiterschicht, wodurch eine Kompensationsdotierung der darunter liegenden GaN-Pufferschicht notwendig ist. Diese Dotierung führt jedoch zu unerwünschten Dispersionseffekten – sowohl bei der Hochfrequenz-Signalverstärkung als auch beim Hochspannungsschalten. Am FBH verwenden wir daher alternativ eine AlN-Pufferschicht, die auch ohne Dotierung für eine ausreichende Eingrenzung der GaN-Kanalschicht sorgt. So haben wir mit identischen AlN-basierten Halbleiterstapeln sowohl Schalttransistoren mit über 1790 V Spannungsfestigkeit prozessiert als auch mm-Wellen Verstärkertransistoren mit einer Ausgangsleistung von 2,2W/mm bei 30 GHz. Durch den präzise eingegrenzten GaN-Transistorkanal steigt die Ausgangsleistung für 10 GHz kontinuierlich mit der Drainspannung an und erreicht bei 35V einen Wert von 3,4W/mm.

III-V Technology

III/V-Technologie



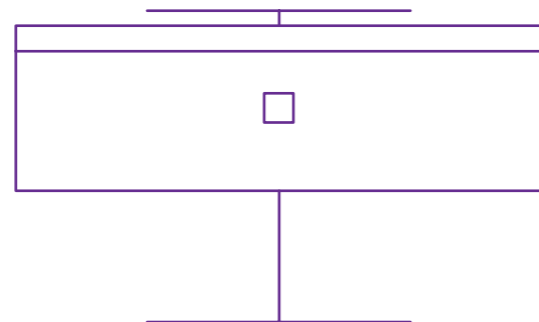
The research area III-V technology combines our know-how and resources at FBH in materials and process technology as well as mounting and packaging. These competencies form the basis for the development of devices in the photonics, III-V electronics and integrated quantum technology research areas.



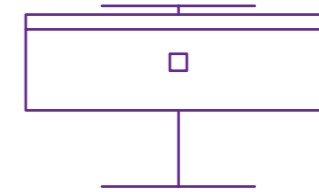
- > **Epitaxy nitrides** – heterostructures for UV LEDs, UV photodetectors, violet laser diodes, and GaN transistors. These heterostructures are the basis for the respective devices at FBH. Additionally, we develop HVPE growth processes for AlN templates.
- > **Epitaxy arsenides** – we develop and realize heterostructures for GaAs laser diodes over the whole wavelength range from 630 nm – 1200 nm for FBH devices as well as for external customers. We also fabricate 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.

- > **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.



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



- > **Epitaxie Nitride** – Heterostrukturen für UV-LEDs, UV-Fotodetektoren, violette Laserdioden und GaN-Transistoren. Diese Heterostrukturen sind die Basis für die Entwicklung der entsprechenden Bauelemente am FBH. Weiterhin forschen wir an HVPE-Prozessen für AlN-Templates.
- > **Epitaxie Arsenide** – Heterostrukturen für GaAs-Laserdioden im gesamten Wellenlängenbereich von 630 nm – 1200 nm sowohl für die Bauelemententwicklung am FBH als auch für externe Kunden. Darüber hinaus werden SAM-Strukturen für gepulste Lasersysteme entwickelt.
- > **Prozesstechnologie** – Prozesse für eine Vielzahl von Bauelementen auf Basis von GaAs, InP und GaN sowie auf den neuartigen Materialien Diamant, AlN und Ga₂O₃. Diese realisieren wir auf der industrie-kompatiblen und zugleich flexiblen Prozesslinie auf Waferdurchmessern von 2" bis 4" wie auch auf kleineren Proben und Waferteilstücken und entwickeln sie beständig weiter.

- > **Aufbau- und Verbindungstechnik** – die Bauelemente montieren wir auf Wärmesenken oder in Gehäuse – bei Bedarf hermetisch verschlossen – und machen sie damit für den Aufbau zu Modulen und Systemen nutzbar.
- > **Materialanalytik** – unterstützt die Entwicklungen in der Epitaxie durch Charakterisierung der Eigenschaften der Halbleiterstrukturen. Diese Kompetenzen setzen wir auch für die Entwicklung von Prozess- und Montageschritten sowie für die Analyse von Ausfallursachen der entwickelten Bauelemente ein.

Wir nutzen unsere technologische Infrastruktur auch für Aufträge von externen Partnern, indem wir z.B. Prozessmodule bereitstellen, Fertigungstechnologien entwickeln, Epitaxiestrukturen liefern oder Gerätedemonstratoren entwickeln und fertigen.

Dark spots around threading dislocations in GaN and AlGaN crystals – impact on internal quantum efficiency

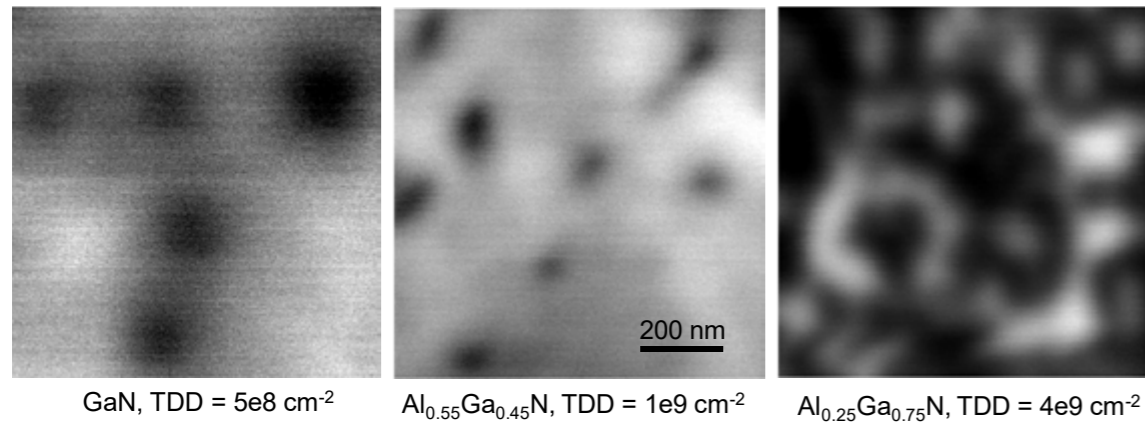


Fig. 1. Panchromatic cathodoluminescence images ($T = 83\text{ K}$, $U_{\text{accel}} = 3\text{ kV}$) of dark spots with varying diameter in (Al)GaN epitaxial layers with different threading dislocation density (TDD).

AlGaN-based structures for optoelectronic devices like LEDs and laser diodes emitting in the UVB and UVC spectral range are usually grown heteroepitaxially on sapphire substrates or on AlN-based underlayers. In both cases, the lattice mismatch between epitaxial layers and substrate results in formation of threading dislocations in high density up to 10^{10} cm^{-2} . Some of those dislocations propagate in growth direction through the whole epitaxial structure and act as centers for non-radiative recombination in the active region. In luminescence experiments with high spatial resolution in the sub-micrometer range, dislocations lead to circular areas with reduced light emission, the so-called “dark spots”. These spots have been extensively studied in binary GaN layers. However, studies on dark spots in AlGaN structures are rare even though this material is widely used in UV-emitting devices. High densities of threading dislocations (TDD) in combination with large dark spot diameters can significantly reduce the light generation efficiency in AlGaN crystals.

We have investigated dark spot diameters in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ layers by cathodoluminescence measurements in dependence on the aluminum content x and the sample temperature. While binary

GaN features dark spot diameters of $> 110\text{ nm}$ HWHM (half width at half maximum of the intensity distribution), the diameter decreases drastically to around 75 nm when only a few percent aluminum is present. Smallest dark spot diameters of about 50 nm are found for AlGaN with 45 – 85% aluminum content. The diameter seems to increase again for even higher aluminum concentrations towards the binary AlN.

This dependence correlates with the effect of charge carrier localization in band gap fluctuations in AlGaN, which is also confirmed by the temperature-dependence of dark spot diameters. A higher compositional disorder leads to stronger localization of electrons and holes in nanometer-sized areas with reduced band gap. Pure statistical fluctuations of the distribution of gallium and aluminum atoms in the crystal lattice are sufficient to produce these localization sites in AlGaN. Even thermal energies around room temperature are too low for a complete delocalization. So, the non-radiative centers at threading dislocations cannot be reached by the localized charge carriers. The probability of radiative recombination is enhanced, even in close vicinity to dislocation cores. This localization effect sets in already for a very small amount of aluminum in AlGaN and increases with

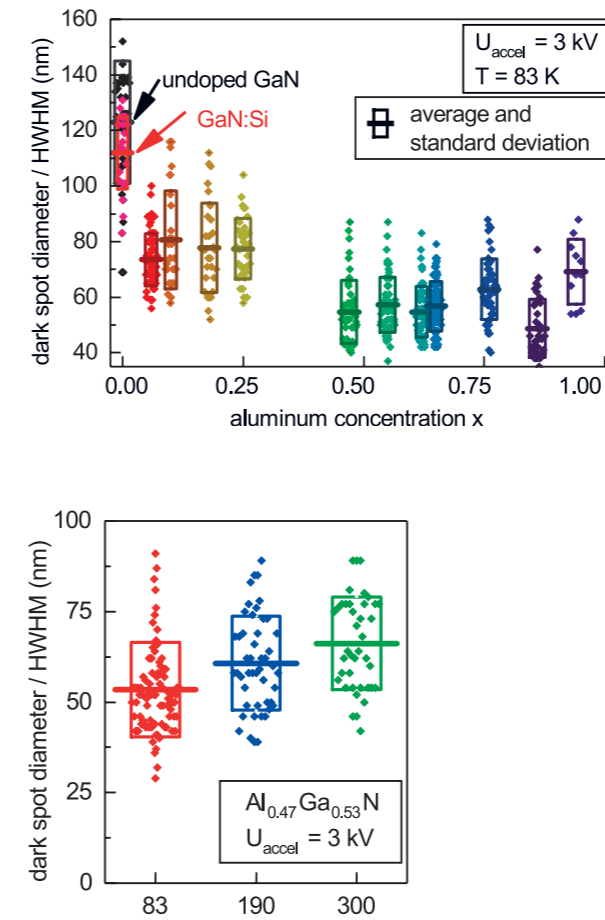


Fig. 2. Dark spot diameter in dependence on aluminum concentration in AlGaN layers and on sample temperature in $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$.

inhomogeneity in the medium and higher composition range. For GaN, the effect of charge carrier localization is negligible. Electron-hole pairs can reach the dislocation cores easily by diffusion or they are separated in weak strain-induced electric fields near the intersections of interfaces and dislocations. Accordingly, the dark spots are much bigger in GaN.

The reduction in the internal quantum efficiency by the presence of threading dislocations can be estimated from this study. In $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ with $x \approx 0.5$ and at room temperature, a TDDs of $4 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$ results in an intensity reduction $\geq 25\%$ over nearly the whole area of a sample. For a TDDs of $1 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$ the intensity is reduced over only a quarter of the area and for a TDDs of $1 \times 10^8\text{ cm}^{-2}$ only 3% of the area show reduced intensity. In case of GaN layers the affected areas are approximately 2.5 times larger, implying also strong overlapping of dark spots for a TDD of $4 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$.

This work was partially funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Advanced UV for Life consortium (UVPower, 03ZZ0134B).

Epitaktisch gewachsene AlGaN-Schichten für LEDs oder Halbleiterlaser zeigen hohe Dichten an Versetzungen, die sich in Wachstumsrichtung durch die Kristallstruktur ziehen. An diesen Versetzungen entstehen erhöhte nichtstrahlende Verluste, die kreisförmige Gebiete mit verminderter Lichterzeugung bilden. Dies lässt sich anhand von hochauflösenden Lumineszenzmessungen beobachten. Derartige Verluste können die interne Quantenausbeute deutlich mindern.

In Untersuchungen mittels hochauflösender Kathodolumineszenz konnten wir zeigen, dass Kompositionsfluktuationen in AlGaN die Ausdehnung der dunklen Gebiete um die Versetzungen reduzieren. Bei Raumtemperatur führt eine Versetzungsdichte von $4 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$ in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ mit $x \approx 0.5$ zu einer annähernd vollständigen Bedeckung der Probenfläche mit dunklen Flecken mit Intensitätseinbußen $\geq 25\%$. Der Flächenanteil reduziert sich auf ein Viertel bei einer Dichte von $1 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$ und auf wenige Prozent bei $1 \times 10^8\text{ cm}^{-2}$. In GaN-Schichten sind die betroffenen Flächen etwa 2.5-fach größer.

Publication

C. Netzel, A. Knauer, F. Brunner, A. Mogilatenko, M. Weyers, “Temperature Dependence of Dark Spot Diameters in GaN and AlGaN”, Phys. Status Solidi B 258, 2100358 (2021).

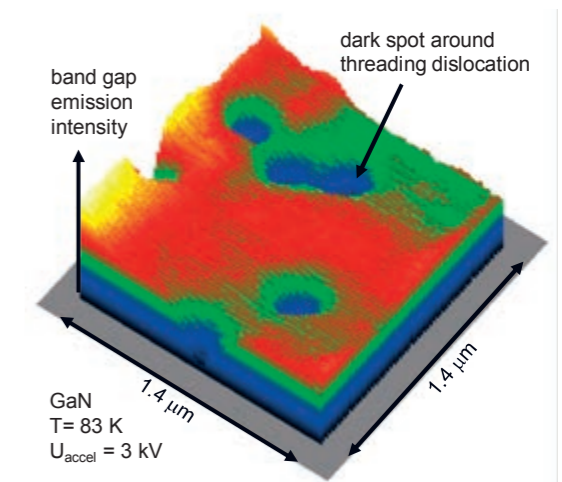


Fig. 3. Distribution of the band gap emission intensity with sub-micrometer resolution, deduced from a hyperspectral cathodoluminescence mapping. Dark spot diameters are determined from these mappings.



④ Representative secondary electron microscopic cross-sectional image of an (In,Al)GaAs-based SESAM recorded in back-scattered electron mode.

Development of III-V based optically pumped VCSELs for ultrashort pulse lasers

Ultrashort pulse lasers with picosecond (ps) pulses and high peak powers are key to cold (athermal) ablation and are utilized in industrial processes such as cutting, drilling, and marking. The required high-energy ps-pulses are generated either by Q-switching (QS) or mode-locking (ML). The compact systems for QS enable high pulse energies, but only with long pulses in the nanosecond (ns) range. For ML, on the other hand, the systems yield short ps-pulses, but high pulse energies can only be achieved in rather complex assemblies. This gap between QS and ML can be bridged with Q-switched microchip lasers, obtaining pulse durations of several tens of ps. Very recently, GaAs-based semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) have been developed at FBH that enable pulses of 144 ps duration and 300 nJ pulse energy at 1064 nm from a compact QS solid-state laser system [1-3].

We report here on the development of an all-semiconductor gain-switched ultrashort pulse laser with an (Al,In)Ga(As,P)-based

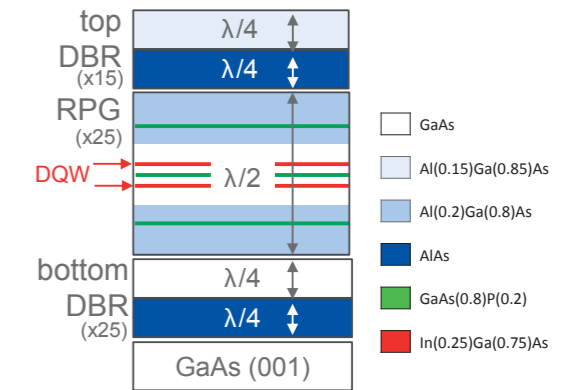
resonant periodic gain structure (RPG) in an optically pumped vertical cavity laser (OP-VCSEL) emitting around 1030 nm. Since a single VCSEL cavity has a low gain volume, a large number of active regions is required to achieve a high output pulse power. The RPG structure consists of 25 InGaAs double-quantum well cavities placed on top of a 25-fold AlAs/GaAs distributed Bragg mirror (DBR) (see Fig. 1). For best optical confinement throughout the cavity periods, precise control of all cavity materials was maintained by properly adjusting the layer thicknesses during a multistep growth process utilizing metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) in a 12x4" Aix2800G4 planetary reactor. In order to suppress strain relaxation of the high number of InGaAs double quantum wells (DQWs), we developed an elaborate GaAsP-based strain compensation scheme. The strain state was monitored in-situ via the wafer curvature, which for the final compensation scheme (98 % compensation) on 350 μm thick substrates was in the range of 1/km per cavity. For sufficient barrier pumping at 850 nm over

all 25 cavities, the DQWs were embedded in GaAs, while about two thirds of a single cavity consisted of $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, which is transparent at this wavelength. Finally, a 15-fold AlAs/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ DBR, designed for 97.5 % transmission at 1030 nm and transparency for any pumping wavelength above 850 nm, was deposited on top of the RPG. Laser operation has been obtained by optical excitation with 120 ps long pulses at 950 nm ('in-well' pumping only into the QWs) as well as at 850 nm ('barrier' pumping also of the surrounding GaAs barriers) using the laser system described in [3].

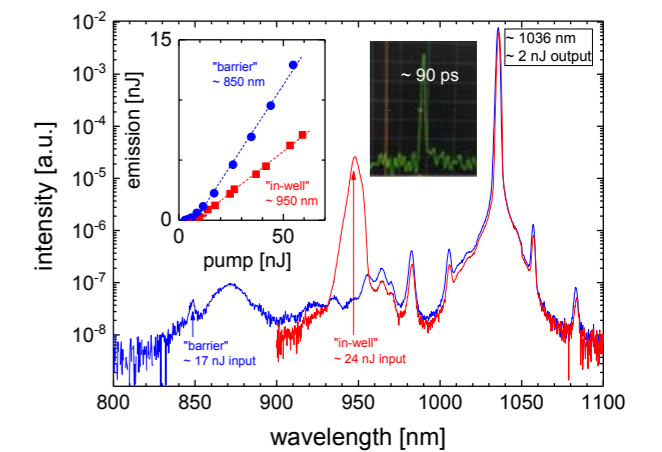
Fig. 2 shows the optical spectra of the OP-VCSEL at 2 nJ optical output for barrier and in-well pumping. As can be seen in the insert, a distinct input/output threshold behavior is evidently independent of the pumping scheme, while the slope directly scales with the corresponding absorption volume. Very low pumping threshold of about 10 nJ and pulses of 90 ps duration at 195 nJ, which corresponds to the time-resolution measurement limit of the detection system, are obtained. Optical efficiencies of about 10 % and 3 % are achieved at 10 nJ and reach 25 % and 11 % at 60 nJ for barrier pumping and in-well pumping, respectively.

These results pave the way for pulsed laser systems that are based only on a pulsed pump laser diode and an OP-VCSEL chip. Part of this work was supported by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Germany (ZIM grants No. 16KN053031 and 16KN053066).

Ultrakurz-puls-Laser werden unter anderem zum industriellen Schneiden, Bohren und Markieren eingesetzt. Für derartige Anwendungen haben wir einen optisch gepumpten Laser mit vertikalem Resonator (OP-VCSEL) entwickelt, der um 1030 nm emittiert. Um hohe Pulsenergien von einigen Nanojoule bei gleichzeitig kurzer Pulsdauer von wenigen Pikosekunden erreichen, haben wir eine (Al,In)Ga(As,P)-basierte Verstärkerstruktur mit 25 InGaAs-Doppelquantenfilmen entwickelt. Die dafür nötige Verspannungskompensation (98 %) in den Quantenfilmen erreichen wir durch den Einsatz von GaAsP-Schichten. Durch optische Anregung mit 120 ps langen Eingangspulsen wurde ein Laserbetrieb bei 1036 nm mit sehr niedriger Pumpschwelle um circa 10 nJ und kurzer Ausgangspulsdauer von höchstens 90 ps (begrenzt durch die Messauflösung) bei 195 nJ erzielt. Bei Einstrahlung mit 950 nm („in-well“-Pumpen nur in die Quantenfilme) haben wir optische Wirkungsgrade von etwa 3 % an der Schwelle bzw. 10 % bei 60 nJ Pumpleistung nachgewiesen. Bei 850 nm („Barriere“-Pumpen auch des umgebenden GaAs-Materials) betrug die Effizienz circa 11 % bei 10 nJ bzw. 25 % bei 60 nJ. Diese Ergebnisse bereiten den Weg für gepulste Lasersysteme, die lediglich eine gepulste Pumplaserdiode und einen OP-VCSEL-Chip benötigen.



④ Fig. 1. Schematic of the investigated OP-VCSEL structure consisting of a 25-fold AlGaAs-based bottom DBR, a 25-fold resonant periodic gain structure (RPG), and a 15-fold AlGaAs-based top DBR. The color-coding depicts the layer materials used in the design.



④ Fig. 2. Intensity spectra for barrier (blue) and in-well (red) pumping of the OP-VCSEL for 2 nJ optical output. The inserts show the corresponding input/output threshold characteristics (left) and the pulse transient recorded at 195 nJ output (right).

Publications

[1] A. Marianovich, S. Spiekermann, M. Brendel, P. Weßels, J. Neumann, M. Weyers, D. Kracht, "Picosecond Optical Parametric Generation in the Red to Near Infrared Band with a MgO:PPLN Crystal Pumped by an Amplified Passively Q-switched Microchip Laser", OSA Laser Congress 2020 (ASLL, LAC) (2020).

[2] A. Marianovich, S. Spiekermann, M. Brendel, P. Weßels, J. Neumann, M. Weyers, D. Kracht, "Wedged Nd:YVO4 crystal for wavelength tuning of monolithic passively Q-switched picosecond microchip lasers", Opt. Express 29, 19790-19795 (2021).

[3] A. Marianovich, S. Spiekermann, M. Brendel, P. Weßels, J. Neumann, M. Weyers, D. Kracht, "Q-switched microchip laser-based picosecond light source in the visible-red to near-infrared band for semiconductor photoluminescence spectroscopy", Opt. Express 30, 15428-15435 (2022).

Preliminary studies for hetero-integration of InP on silicon using In bumps

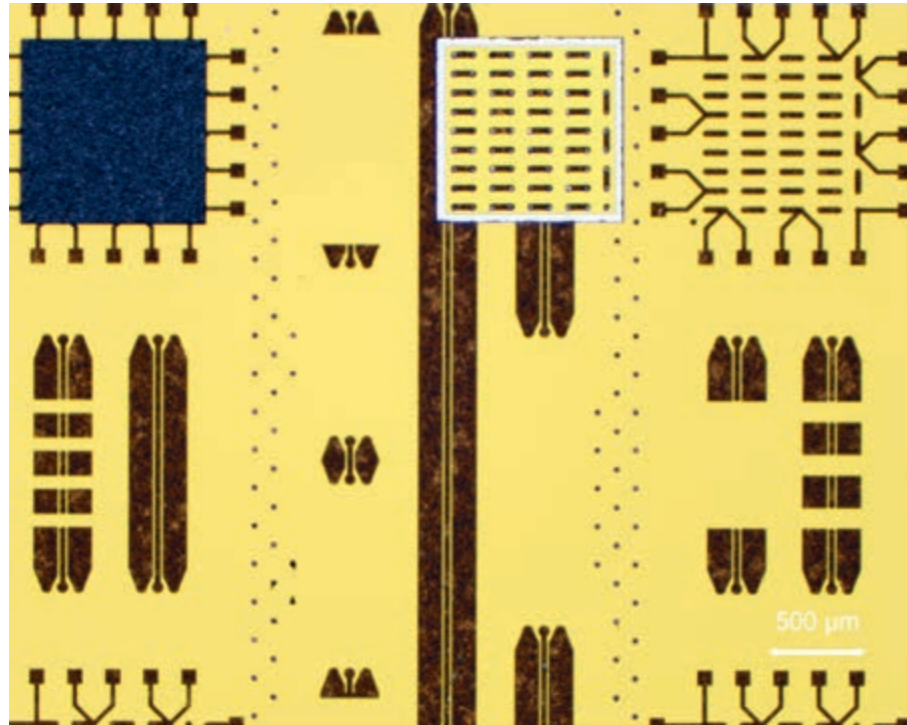


Fig. 1. Top view on the test substrate with a flip-chip bonded test chiplet (upper left) and the back side of a test chiplet with indium bumps on it.

In the last years, new applications in digital connectivity, data processing and transmission have driven the development of new microelectronic devices. Silicon is still by far the most commonly used material in microelectronics. Its material properties, however, face the limits when required for deployment in demanding applications like high frequency 6G implementation. To combine the functionality and high level of processability of silicon with materials suitable for high frequency application like indium phosphide (InP), such chips need to be integrated on silicon for functional devices. This has to be done on wafer level to keep the lead length as short as possible in order to shorten the signal runtime, reduce the electrical power losses and to enable a joint fabrication process.

Another important parameter for heterointegration is the bonding temperature applied during flip-chip assembly of the chips on the silicon wafer. The lead-free solders used for assembling of microelectronic chips need temperatures in the range of 250 °C. Such high temperatures might influence the performance of the chips to be integrated on silicon or even damage them. An

alternative solder material with lower melting temperature is pure indium with a melting temperature of 156,6 °C. In preparation of heterointegration of InP chips on silicon for high frequency applications using low melting temperature indium as a solder we carried out bonding tests with silicon chips on silicon carriers. The leads as well as the contact pads on the chips and on the carrier were fabricated in FBH's cleanroom by electrodeposition of several micrometer of gold. On top of the gold on the silicon test chips, a few micrometers of indium were deposited (Fig. 1). Further details regarding the process can be found on p.104.

We performed the flip-chip assembly of the chips on the silicon carrier using a flip-chip bonder. The assembly tests were carried out at different soldering temperatures using formic acid. Subsequent electrical tests after the assembly confirmed the good electrical contacts of the bonds described in literature. The main focus of the pretests was to investigate the mechanical stability of the indium bonds. Indium is much more ductile compared to conventional solders. Its shear strength is reduced

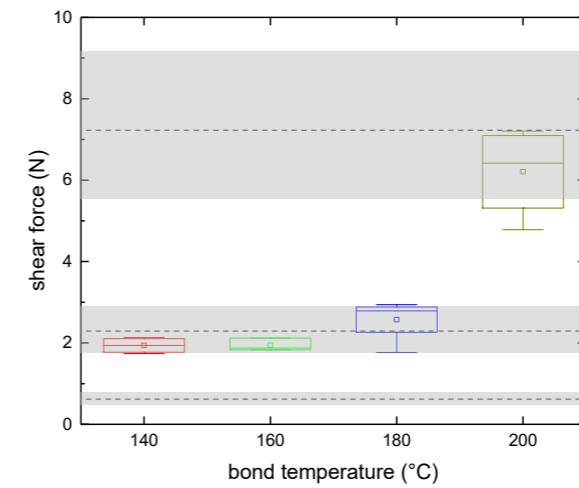


Fig. 2. Shear force in dependence of bond temperature.

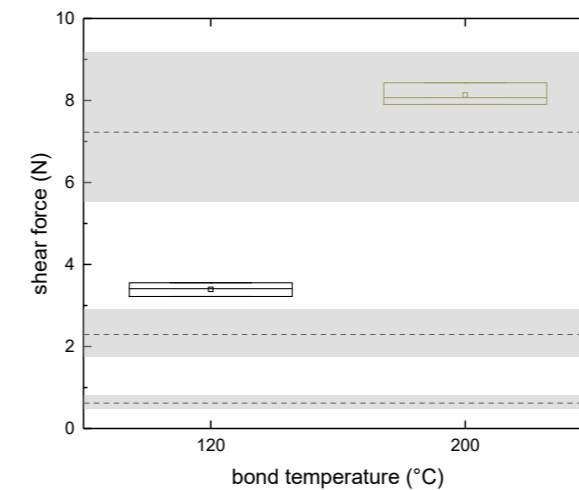


Fig. 3. Shear force for two different bond temperatures after 20 hours annealing at 150 °C.

by a factor of five compared to SnAgCu solder. The lower strength of pure indium bonds results in a weak mechanical connection of the chips on the silicon wafer. This might lead to losing chips in further processing steps like sawing or cleaning. When indium is used as a solder sandwiched between two gold contact pads, as in our samples, the strength of the bonds is clearly improved. Immediately after the contact between gold and indium, diffusion of indium into gold and vice versa starts, leading to the formation of new intermetallic phases. The newly formed AuIn and AuIn₂ phases at the contact area increase the shear strength significantly. We investigated the impact of the bond temperature on the shear force, as well as the dependence of the annealing time on the shear force after bonding. The results are presented in Fig. 2 and Fig. 3.

The black dotted lines indicate calculated shear forces for the corresponding contact areas where the single In bump contact has a diameter of 40 μm. For the calculation shear strength values from literature of pure indium (lowest dotted line), of AuIn₂ intermetallic phase (middle dotted line) and of AuIn inter-

Bei anspruchsvollen Hochfrequenz-Anwendungen, wie etwa 6G-Netzwerken, kommt das etablierte Silizium oft an seine Materialgrenzen. Jedoch können Materialien wie Indiumphosphid (InP), die sich für hohe Frequenzen eignen, auf Silizium integriert werden. Ein wichtiger Parameter für die Heterointegration ist die Bondtemperatur. Bleifreie Lote, die zur Montage von Mikroelektronikchips verwendet werden, benötigen Temperaturen im Bereich von 250 °C. Derartig hohe Temperaturen können die Funktionalität der zu integrierenden Chips jedoch beeinträchtigen oder sie sogar beschädigen. Reines Indium mit einem Schmelzpunkt von 156,6 °C eignet sich als alternatives Lotmaterial. Um die Heterointegration von InP-Chips auf Silizium für Höchstfrequenzanwendungen vorzubereiten, haben wir Verbindungstests von Siliziumchips mit Indium-Bumps auf Siliziumträgern durchgeführt. Bei diesen Vorversuchen haben wir insbesondere die mechanische Stabilität der Indium-Bonds untersucht. Es zeigte sich, dass Indium als Lötmaterial zwischen zwei Goldkontaktpads die Festigkeit der Verbindungen deutlich verbessert.

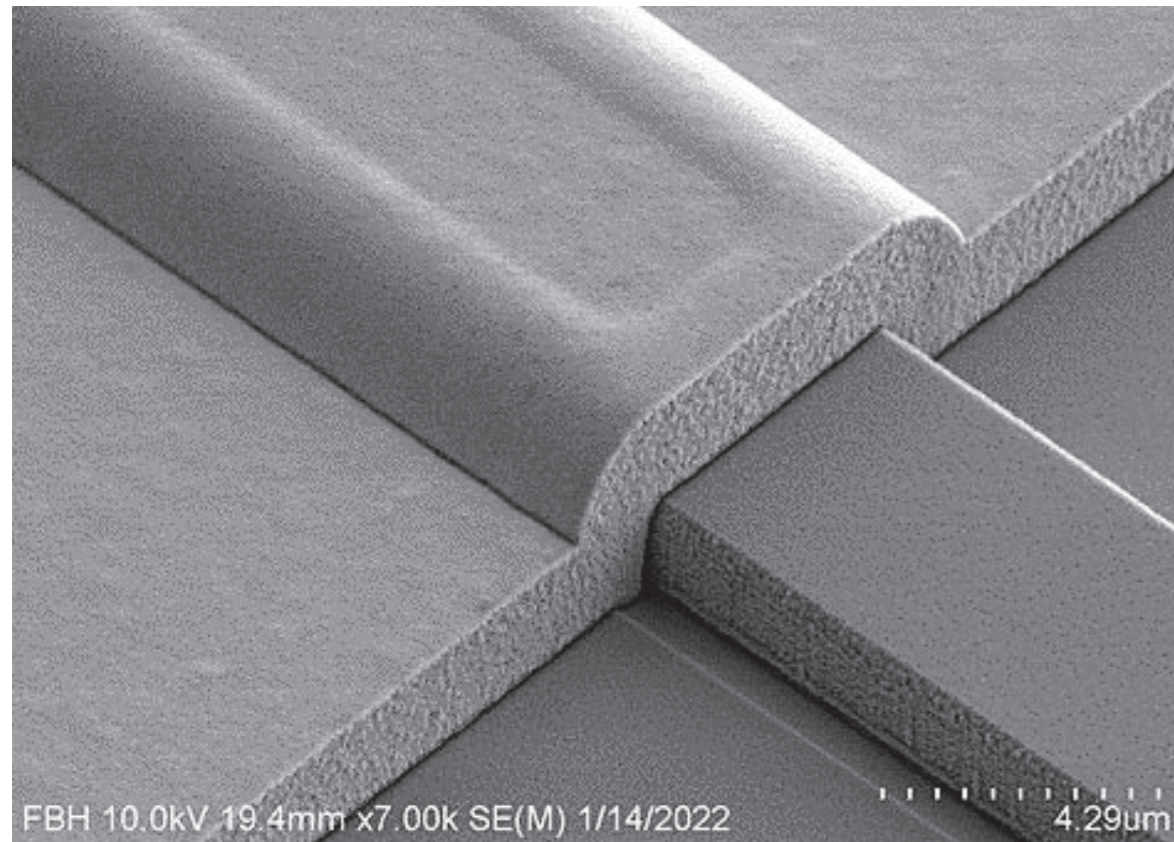


Fig. 1. Extremely smoothly plated gold layer on laser bars for increased process yield and facilitated facet processing.

Galvanic metal deposition – bridging the range from micrometer to nanometer scale

Galvanic metal deposition is an important technology step in the fabrication chain of compound semiconductor devices. This electrochemical method allows deposition of metals, such as gold, from aqueous solution on wafers. It only requires a seed layer (plating base) to provide an electrically conducting layer. This seed layer is contacted at the perimeter of the wafer that is immersed in the aqueous electrolyte and plated, followed by cleaning and drying steps.

With financial support from the German BMBF, FBH has acquired a modern electroplating tool that comprises four plating chambers for the deposition of different metals, a cleaning chamber and a further one for pretreatment to condition the wafers. The tool handles fully-automatically 75 mm and 100 mm wafers from cassette to cassette, allowing dry-in dry-out processes without any manual intervention. We have put this tool into operation with two gold plating baths, a nickel and a tin plating bath.

The smoothness of deposited layers is critical in fabrication technology. It depends not only on the process parameters applied, such as bath temperature and current density, but also on the chemical composition of the electrolyte. The new tool offers a convenient way to apply and compare sulphitic and cyanidic gold electrolytes as well as to customize the plating process. Fig 1 shows a SEM picture of a uniform and very smooth gold top layer on a laser bar. These enhanced properties increase the yield, facilitate facet coating of the diode lasers and promote enhanced reliability.

Fig 2 shows another application of electroplated structures in technology development. Gold studs to allow flip-chip bonding of terahertz devices were plated from a sulphitic gold bath. The excellent smoothness of the structures is a prerequisite for high bonding yield. Furthermore, the application of such uniform layers for redistribution wiring is expected to minimize radiation losses.

Innovative fabrication concepts often comprise wafer-to-wafer bonding processes. One option is metal-to-metal bonding where metal layers are deposited on each of the wafers, the wafers are flipped face-to-face and joined with heat and pressure. Popular metal layers for such applications are, e.g., tin and gold. Important pre-requisites for successful bonding are uniform and smooth metal thicknesses. Fig 3 shows the thickness distribution of a plated stack of tin and gold layers with a nominal thickness of 2,000 nm on a wafer of 100 mm diameter. Such metal stacks can be plated within some minutes and are almost free of any internal stress, hence preventing wafer bow that can impede further lithographical steps.

Moving from micrometer towards nanometer scale, galvanic metal deposition into nanostructured photoresist and hard-masks can also help to overcome limitations of physical vapor deposition (PVD) of metals. This is due to a well-defined undercut, which is required to allow resist removal after PVD and metal lift off. The smaller such structures are the more challenging it is to reproducibly create such undercuts. Plating technology has the advantage to fill only gaps in the resist masks from bottom to top – no slanted resist profile is needed. Furthermore, metal lift-off is replaced by simple resist removal. Fig 4 shows a SEM picture of galvanic gates plated in a resist mask from gold bath with a (buried) gate length of 150 nm, a gate head width of 650 nm and 900 nm height before back-etch of the plating base. The new automated electroplating tool extends the process capabilities at FBH to deposit also tin and nickel besides gold. Moreover, we can customize the plating process even better for developments of novel devices that meet the ever-increasing demand for higher frequencies and power, smaller chip size, and more efficient power consumption.

Financial support by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the “Research Fab Microelectronics Germany (FMD)” framework under ref. 16FMD02 is gratefully acknowledged.

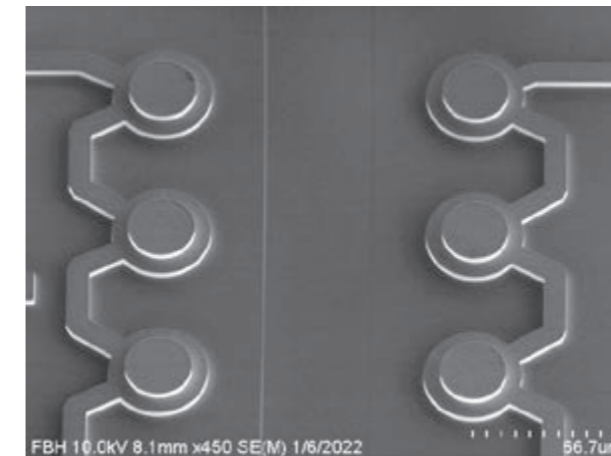


Fig. 2. Electroplated gold studs for terahertz bonding applications.

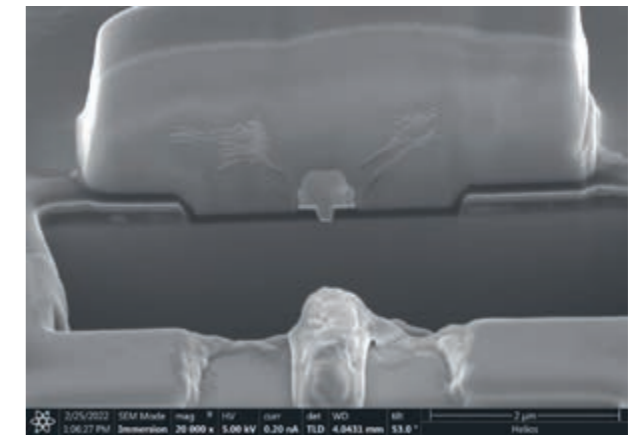


Fig. 4. Cross section of electroplated gates for the 150 nm technology node, exhibiting a gate width of 150 nm and a head width of 450 nm after back-etch of the plating base.

Das FBH hat eine leistungsfähige, moderne Galvanikanlage in Betrieb genommen, die vollautomatische galvanische Beschichtungen von 75 mm und 100 mm Wafern ermöglicht. Integriert ist auch eine Option, um Vorbehandlungen sowie Reinigungs- und Trocknungsschritte durchzuführen.

Das Gerät verfügt über vier Galvanikkammern, die mit zwei unterschiedlichen kommerziellen Goldbädern sowie einem Nickel- und einem Zinnelektrolyt befüllt wurden. Es bietet damit eine Vielzahl an Möglichkeiten, um Wafer in exzellenter Qualität zu beschichten. Die damit abgeschiedenen Mikro- wie auch Nanostrukturen verfügen über eine ausgezeichnete Schicht-homogenität und eine äußerst geringe Oberflächenrauigkeit – und somit über wichtige Eigenschaften, um die elektrische und optische Ausbeute vieler Bauteile zu verbessern.

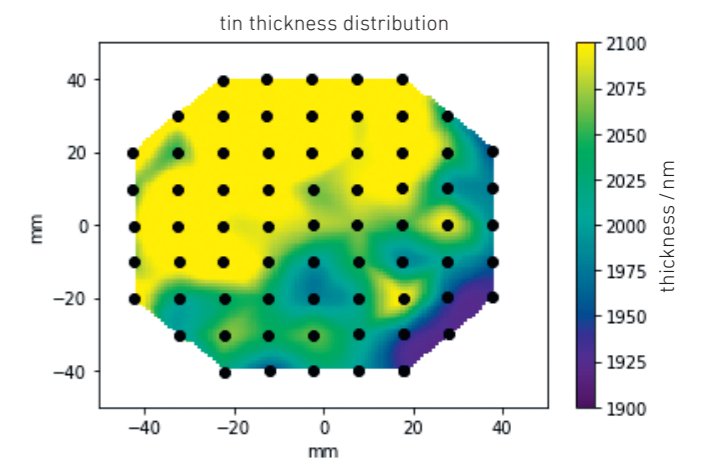


Fig. 3. Thickness distribution of a plated stack of gold and tin layers on a 100 mm wafer.

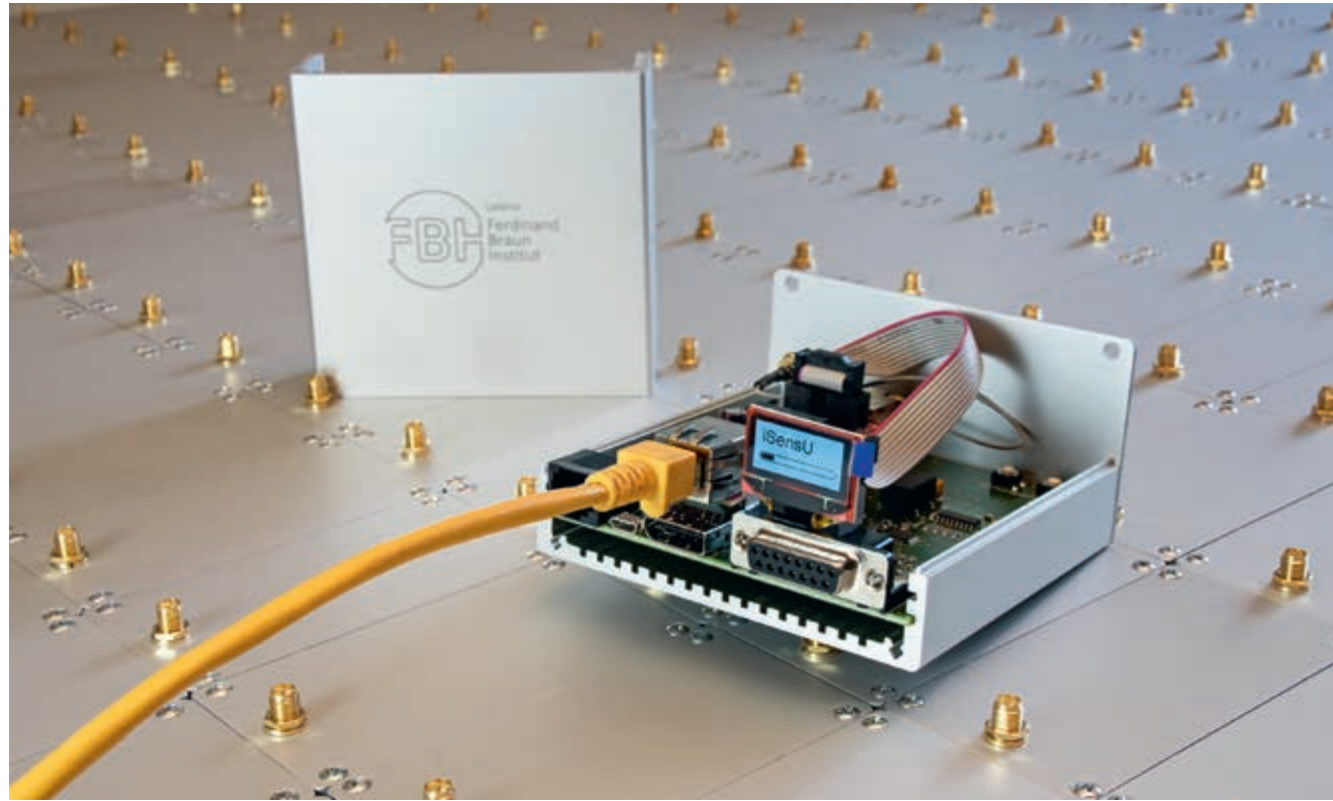


Fig. 1. iSensU (intelligent Sensor Unit) provides connectivity to analog sensors, legacy resources and digital sensors.

Reaching full production traceability – introducing digital processing control into an R&D environment

Digitization and the Internet of Things (IoT) are deeply impacting production processes in factories and laboratories worldwide. Within an EFRE-funded project, FBH is currently completely digitizing its fabrication processes using a modern Manufacturing Execution System (MES) software. Besides, we developed the fully customizable IoT node called *iSensU* to gather sensor data from any type of processing equipment. This device can even be used with older systems that do not have a digital interface. The combination of software and hardware establishes a digital twin of every wafer, resource, or any other item in our cleanroom. It provides full digital process control and history of every element present on the fabrication floor.

Every process can be monitored and optimized with this digital manufacturing tracking, and production data (both process- and equipment-related data) become traceable. Sources of error are eliminated, while resource efficiency, quality, and yield are improved. Our customers benefit from this development with a product, digitally documented from start to finish.

2021 marked an important milestone in the roll-out of the MES as it saw the first wafer processed under exclusive control of the new MES software. From October to December, a lot of four wafers was successfully processed on a flow with over 60 steps. This represents the culmination of four corner-stone activities:

- 1 Definition of master data, providing information on objects such as available resources and associated recipes, but also the workflows and organizational structures. In this process, standardized naming conventions across several administrative groups of our institute have been established.
- 2 Modeling of the production process based on master data, considering both the institute-specific requirements and the MES software philosophy.
- 3 Iterative employee training, from technicians to MES specialists.
- 4 Provision of custom-made user interfaces to provide low-threshold access to the MES features.

At the same time, the project team has assembled a small production series of 300 *iSensUs* (intelligent Sensor Units), a custom-made and highly configurable IoT device for connecting resources without a modern interface. The production was expedited despite an extremely tight market for electronic components and disrupted supply chains. 250 units (see Fig. 1) were delivered to our partner institutes that have joined forces within Research Fab Microelectronics Germany (FMD), and the rollout of the units has now begun.

Furthermore, additional hardware for input/output of data, such as tablets and scanners, has been purchased and put into operation. Continuous feedback was given to the MES developer team to customize the software for the manufacturing environment, spanning from R&D to pilot production.

With a fully implemented MES-guided processing, all data will be available at the tip of a finger. The MES will become a valuable, supporting tool to FBH's staff on its road to increased process flexibility, productivity, and quality. In addition, the MES will be the platform for efficient manufacturing in distributed individual institutes within the framework of the FMD virtual fab, which provides tailor-made technologies and system developments in microelectronics.

This work was funded by the European Commission under EFRE 1.8/17.

Produktionsmanagement, Datenerfassung und Qualitätssicherung werden am FBH zurzeit in ein modernes Manufacturing Execution System (MES) überführt. Damit bringt das FBH die Digitalisierung und das Internet der Dinge (IoT) aus der industriellen Fertigung in ein F&E-Umfeld. Für die MES-Integration haben wir zudem *iSensU* (intelligent Sensor Unit) entwickelt. Das kostengünstige IoT-Gerät ist ein weiterer Baustein, um Prozesse umfassend zu überwachen. Es bietet Ad-hoc-Konnektivität zu bestehenden, auch älteren Anlagen ohne digitale Schnittstelle und ermöglicht den Einsatz digitaler Sensoren. *iSensU* liefert kontinuierlich sensorische Daten, und bindet so Anlagen jeden Typs in das MES ein, füttert Datenbanken oder löst präventive Wartungen aus. Zur Qualitätskontrolle werden alle Prozessdaten zentral gespeichert und sind jederzeit abrufbar.

Das FBH und seine Kunden profitieren von der komplett digitalen Dokumentation, mit der sich jeder Prozessschritt vom Rohmaterial bis zum Produkt rückverfolgen lässt. Dies macht das MES zu einer einzigartig effizienten Plattform für die Entwicklung kundenspezifischer Produkte und bei der Fertigung von Pilot-Serien mit umfassender Qualitätskontrolle.



Fig. 2. The MES software allows full connectivity from all devices – from machine control servers to handheld smart devices.



Annex Anhang

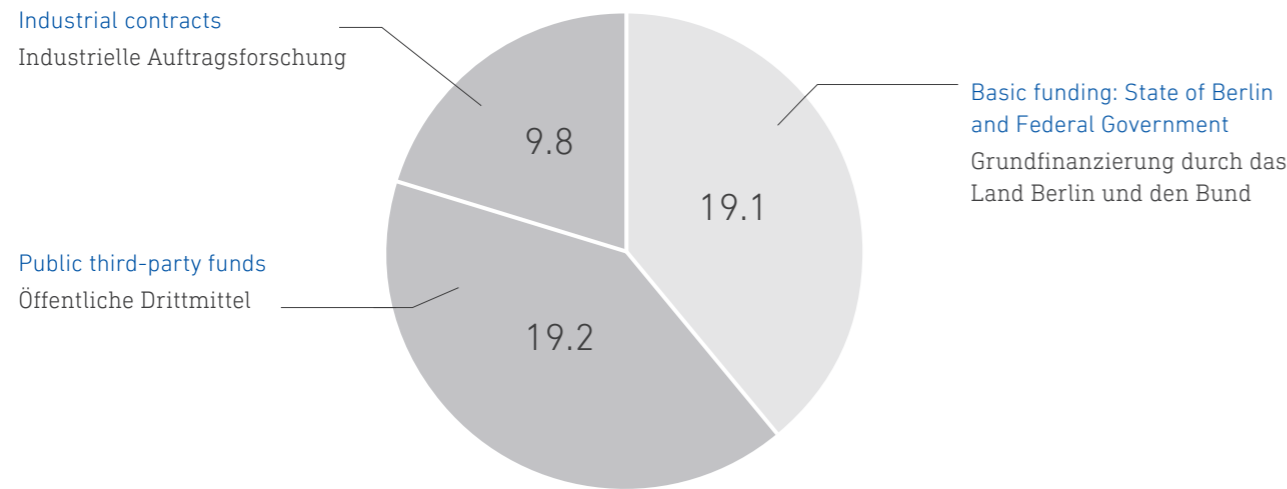
Facts & Figures

Zahlen & Fakten

Founded 1992, 2021 transformation into gGmbH
 Gegründet 1992, 2021 Umwandlung in gGmbH

Budget (in million Euros) | Umsatz (Mio. Euro)

2020

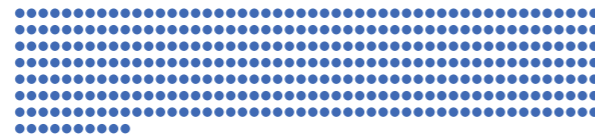


2020

2021

Staff | Team

340 360



Scientists | Wissenschaftlerinnen & Wissenschaftler

146 159



PhD candidates | Promovierende

33 30



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

33 28

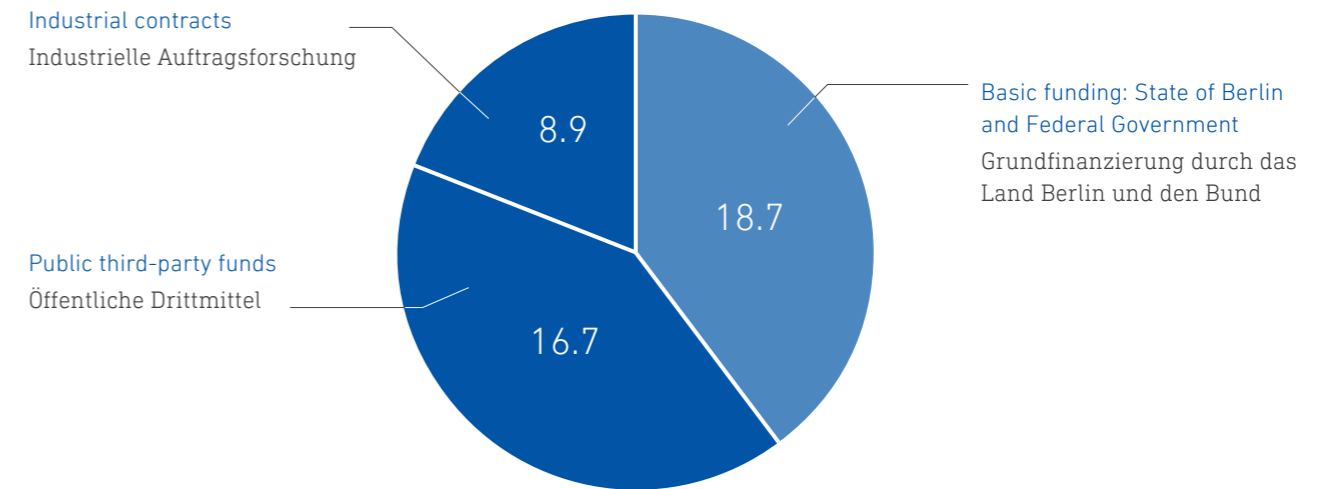


Trainees | Auszubildende

10 8



2021



2020

2021

Projects | Laufende Projekte

246 294



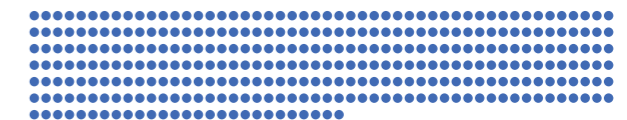
Publications (peer reviewed) | Publikationen (referiert)

104 84



Patents | Patente

305 327



Talks (invited) | Vorträge (eingeladene)

87^{(12)*} 92^{(14)*}



* Many events & conferences were cancelled or postponed due to the COVID-19 pandemic.
 Viele Veranstaltungen & Konferenzen wurden aufgrund der COVID-19-Pandemie abgesagt oder verschoben.

Personnel & Awards

Personalia & Auszeichnungen



🔗 Neysha Lobo Ploch

Change of leadership in the Prototype Engineering Lab

In September 2021, Neysha Lobo Ploch took over the management of the Prototype Engineering Lab at the Ferdinand-Braun-Institut. The PhD and multi-award winning physicist has been conducting research on highly efficient UV LEDs at FBH since 2008. In 2015, she and three colleagues founded the spin-off UVphotonics NT GmbH, for which she continues to be active. She takes over the leadership position from Ulrike Winterwerber, who has built up the prototyping lab since 2014. The team now consists of ten highly qualified employees: engineers, industrial mechanics and other technical staff. With its systems, the Prototype Engineering Lab bridges the gap between research and industry and also has its own electronics laboratory and a fine mechanics workshop.

Führungswchsel beim Entwicklungszentrum

Im September 2021 hat Neysha Lobo Ploch die Leitung des Entwicklungszentrum am Ferdinand-Braun-Institut übernommen. Die promovierte und mehrfach ausgezeichnete Physikerin forscht seit 2008 am FBH an hocheffizienten UV-LEDs. 2015 gründete sie gemeinsam mit drei Kollegen das Spin-off UVphotonics NT GmbH, für das sie auch weiter aktiv ist. Sie übernimmt die Führungsposition von Ulrike Winterwerber, die das Lab für den Prototypenbau seit 2014 aufgebaut hat. Inzwischen besteht das Team aus zehn hochqualifizierten Mitarbeitenden: Ingenieuren, Industriemechaniker*innen und weiterem technischen Personal. Das Entwicklungszentrum schlägt mit seinen Systemen die Brücke zwischen Forschung und Industrie und verfügt über ein eigenes Elektronik-Labor sowie eine feinmechanische Werkstatt.



🔗 Paul Crump

Paul Crump and Neysha Lobo Ploch active in the IEEE Globalization Committee

Two researchers from the Ferdinand-Braun-Institut have taken over leadership roles in the Globalization Committee of the IEEE Photonics Society (IPS) in 2021. Paul Crump will coordinate the work of the IPS Globalization Committee as Globalization Chair until 2023. The goal is to represent all regions worldwide that are active in the field of photonics within the IPS. Currently, research activities in Eastern Europe and Africa in particular are to be expanded and international cooperation is to be intensified. Crump has been involved in the IPS for many years and has already taken on the role as General Chair of the ISLC2021 conference. He has similar plans for 2022 and 2023 – and will be Chair of the Semiconductor Laser Committee at the hybrid CLEO conference in the USA and a committee member of the High-Power Diode Laser Conference at SPIE Photonics West.

Neysha Lobo Ploch is also serving on the Globalization Committee until 2023 as IEEE SIGHT representative. The SIGHT group aims to apply a wide variety of photonics technologies in ways that directly improve the lives of people in developing regions. Its focus is specifically on regions with limited access to R&D resources.

Paul Crump und Neysha Lobo Ploch im Globalisierungs-Komitee der IEEE aktiv

Zwei Forschende des Ferdinand-Braun-Instituts haben 2021 führende Funktionen im Globalisierungs-Komitee der IEEE Photonics Society (IPS) übernommen. Paul Crump wird als Globalisierungs-Chair die Arbeit des IPS Globalisierungs-Komitees bis 2023 koordinieren. Ziel ist es, in der IPS alle Regionen weltweit zu repräsentieren, die im Bereich der Photonik aktiv sind. Aktuell sollen insbesondere entsprechende Forschungsaktivitäten in Osteuropa und Afrika ausgebaut und die internationale Zusammenarbeit intensiviert werden. Crump engagiert sich seit vielen Jahren in der IPS und hat bereits 2021 die Funktion des General Chair der ISLC2021-Konferenz übernommen. Ähnliches hat er sich auch für 2022 und 2023 vorgenommen – er wird Chair des Semiconductor Laser Komitees bei der hybriden CLEO Konferenz in den USA und Komitee-Mitglied der Hochleistungs-Diodenlaser Konferenz im Rahmen der SPIE Photonics West.

Ebenfalls bis 2023 ist Neysha Lobo Ploch im Globalisierungs-Komitee als IEEE SIGHT Repräsentantin aktiv. Die SIGHT-Gruppe will die verschiedensten Photonik-Technologien so einsetzen, dass sie das Leben der Menschen in sich entwickelnden Regionen unmittelbar verbessern. Ihr Fokus liegt speziell auf Regionen mit begrenztem Zugang zu F&E-Ressourcen.

FBH publication is "Editor's Pick" featured by Applied Optics

The publication "783 nm wavelength stabilized DBR tapered diode lasers with a 7 W output power" by Bernd Sumpf, Lara Sophie Theurer, Martin Maiwald, André Müller, André Maaßdorf, Jörg Fricke, Peter Ressel, and Günther Tränkle has been selected as Editor's Pick by the Applied Optics Editorial Office. With that pick, the editorial office honors "articles of outstanding scientific quality that are representative for work in a particular field."

FBH-Publikation von Applied Optics als "Editor's Pick" ausgezeichnet

Die Veröffentlichung "783 nm wavelength stabilized DBR tapered diode lasers with a 7 W output power" von Bernd Sumpf, Lara Sophie Theurer, Martin Maiwald, André Müller, André Maaßdorf, Jörg Fricke, Peter Ressel und Günther Tränkle wurde vom Applied Optics Editorial Office als "Editor's Pick" ausgewählt. Damit zeichnet die Redaktion "Artikel mit hervorragender wissenschaftlicher Qualität aus, die repräsentativ für die Arbeit in einem bestimmten Bereich sind".



Humboldt Research Fellow at FBH

Prof. Dr. Norzaini Zainal from the University of Sains, Malaysia is a visiting scientist at the Materials Technology Department since November 2021. With a research fellowship from the Alexander von Humboldt Foundation, she is working on Al(Ga)N base layers of high crystalline quality for UVC light-emitting diodes.

Humboldt-Forschungsstipendiatin am FBH

Frau Prof. Dr. Norzaini Zainal, von der Universität Sains, Malaysia ist seit November 2021 Gastwissenschaftlerin im Department Materialtechnologie. Mit einem Forschungsstipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung arbeitet sie an Al(Ga)N-Basissschichten von hoher kristalliner Qualität für UVC-Leuchtdioden.

🔗 Norzaini Zainal



🔗 The nominees of the Adlershof Dissertation Award 2021, on the far right Jan Ruschel from FBH.
Die Nominierten des Adlershofer Dissertationspreises 2021, ganz rechts Jan Ruschel aus dem FBH.

FBH PhD students nominated for Adlershof Dissertation Award

Young scientists from FBH regularly apply for the Adlershof Dissertation Award, which acknowledges the outstanding scientific achievements of talented junior researchers. In 2020, Florian Hühn competed with his thesis "Flexible modulator and digital amplifier MMIC for energy-efficient operation of a digital transmission chain in the GHz spectrum". Jan Ruschel participated in 2021 with his dissertation "Causes of current-driven degradation of UV LEDs". Both received 1,000 Euros prize money each for their nomination.

FBH-Doktoranden für Dissertationspreis Adlershof nominiert

Junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem FBH bewerben sich regelmäßig beim Dissertationspreis Adlershof, der Nachwuchsforscher*innen für hervorragende wissenschaftliche Leistungen auszeichnet. 2020 trat Florian Hühn mit seiner Arbeit „Flexibler Modulator und Digitalverstärker-MMIC für den energieeffizienten Betrieb einer digitalen Sendekette im GHz-Bereich“ an. Jan Ruschel war 2021 dabei mit seiner Dissertation „Ursachen der stromgetriebenen Degradation von UV-LEDs“. Beide erhielten für ihre Nominierung ein Preisgeld von jeweils 1.000 Euro.

🔗 Mario Lehwald from the Employment Agency presents the certificate to Marlies Gielow (left) and Marvin Schilling (center), who are responsible for training at FBH.
Mario Lehwald von der Agentur für Arbeit übergibt das Zertifikat an die Ausbildungsverantwortlichen Marlies Gielow (links) und Marvin Schilling (Mitte).

FBH receives sustainability award for equal opportunities

The jury of TOTAL E-QUALITY Deutschland e.V. has honored the Ferdinand-Braun-Institut with the TOTAL E-QUALITY Award 2021 already for the fifth time. As a result, FBH receives the Sustainability Award. The association recognizes the ongoing commitment to equal opportunities and the targeted measures for successful implementation. FBH first received this award in June 2009.

FBH erhält Nachhaltigkeitspreis für Chancengleichheit

Die Jury des TOTAL E-QUALITY Deutschland e.V. hat dem Ferdinand-Braun-Institut das TOTAL E-QUALITY Prädikat 2021 bereits zum fünften Mal verliehen. Damit erhält das FBH zugleich den Nachhaltigkeitspreis. Der Verein würdigt das fortwährende Engagement für Chancengleichheit und die gezielten Maßnahmen zur erfolgreichen Umsetzung. Erstmals hat das FBH diese Auszeichnung im Juni 2009 erhalten.



Employment Agency honors FBH for its efforts in training young people – kick-off for intensified cooperation

Mario Lehwald, Chairman of the Management Board of the Employment Agency Berlin South, has honored the Ferdinand-Braun-Institut for its "outstanding commitment to vocational training" in August 2021. The award was presented during a visit to the institute by the Federal Employment Agency, which was attended by Mario Lehwald and the Managing Director of the Berlin-Brandenburg Regional Office, Dr. Ramona Schröder. FBH has been training three to four young people per year for almost 30 years, and since 1998 especially in microtechnology. The meeting was also a kick-off for closer cooperation in recruiting young people and securing skilled workers.

Arbeitsagentur zeichnet FBH für Nachwuchsarbeit aus – Auftakt für engere Zusammenarbeit

Mario Lehwald, Vorsitzender der Geschäftsführung der Agentur für Arbeit Berlin Süd, hat das Ferdinand-Braun-Institut im August 2021 für sein "herausragendes Engagement in der Ausbildung" ausgezeichnet. Die Auszeichnung wurde im Rahmen eines Besuchs der Bundesagentur für Arbeit am Institut überreicht, an dem neben Mario Lehwald auch die Geschäftsführerin der Regionaldirektion Berlin-Brandenburg Dr. Ramona Schröder teilnahm. Das FBH bildet seit fast 30 Jahren und ab 1998 insbesondere in der Mikrotechnologie jährlich drei bis vier junge Menschen aus. Das Treffen war zugleich Auftakt für eine engere Zusammenarbeit bei der Nachwuchsgewinnung und Fachkräftesicherung.





Virtual city of the Quantum Future Academy – participants could roam around freely using avatars.
Virtuelle Stadt der Quantum Futur Akademie – die Teilnehmenden konnten sich darin mit Avataren frei bewegen.

Events for Experts Veranstaltungen für das Fachpublikum

In 2021, most conferences and workshops organized by FBH and partners again took place digitally or as hybrid formats. Thus, a virtual quantum city was the setting for the three-day **Quantum Future Academy** in August 2021. 55 young researchers from 29 countries met online for workshops and virtual tours through different Berlin laboratories. The Ferdinand-Braun-Institut and HU Berlin again organized the event as local partners. In 2022, the community finally wants to meet in person again.

Also held digitally was the **QTX-5 Quantum Technologies on Small Satellites** workshop in November 2021. The focus was on quantum technologies for space applications. Talks and panel discussions covered recent developments and testing of quantum payloads and related technologies. The event was co-organized by the QTX Research Forum under the leadership of Markus Krutzik from the Ferdinand-Braun-Institut and Humboldt Universität Berlin, and the National University of Singapore.

2021 fanden die meisten Konferenzen und Workshops, die vom FBH und Partnern organisiert wurden, erneut digital oder als hybride Formate statt. So war im August 2021 eine virtuelle Quanten-Stadt Schauplatz der dreitägigen **Quantum Futur Akademie** im August 2021. 55 Nachwuchsforscher aus 29 Ländern trafen sich online zu Workshops und virtuellen Touren durch verschiedene Berliner Labore. Das Ferdinand-Braun-Institut und die HU Berlin haben die Veranstaltung erneut als Partner vor Ort organisiert. 2022 will sich die Community endlich wieder persönlich treffen.

Digital fand auch der Workshop **QTX-5 Quantum Technologies on Small Satellites** im November 2021 statt. Der Fokus lag auf Quantentechnologien für Weltraumanwendungen. In Vorträgen und Podiumsdiskussionen wurden die jüngsten Entwicklungen und Tests von Quantennutzlasten und den dazugehörigen Technologien behandelt. Die Veranstaltung wurde vom QTX-Forschungsforum unter der Leitung von Markus Krutzik vom Ferdinand-Braun-Institut und der Humboldt Universität Berlin sowie von der National University of Singapore mitorganisiert.

Hosting international conferences

Colleagues from FBH organized **ISLC2021** in Potsdam, which was one of the few conferences held in presence this year. The second major conference organized jointly with IUVA was **ICULTA**, as a virtual conference:

Back in Germany after 20 years – the ISLC2021 in Potsdam

More than 100 international scientists were attracted to the five-day International Semiconductor Laser Conference (ISLC) 2021 on site in Potsdam. About the same number of interested participants joined online daily to learn more about current developments in semiconductor lasers, amplifiers, and LEDs. Paul Crump, Head of FBH's High-Power Diode Lasers Lab, organized the conference as General Chair, supported by a 10-member team from the institute.

The hybrid conference was the second in-person event for the laser community since the beginning of the corona crisis. Demand was correspondingly high. The conference in physical presence was completely booked out, and the organizers even had to refuse admittance for more interested parties. The same applied to the accompanying exhibition. The participants were enthusiastic about the direct professional exchange on site. Broadcasting of streamed talks and discussions also worked smoothly. Thanks to the hybrid format, there were almost as many talks and participants as before the corona pandemic.

Organisation internationaler Konferenzen

Kolleginnen und Kollegen aus dem FBH organisierten mit der **ISLC2021** in Potsdam eine der wenigen Konferenzen, die in diesem Jahr in Präsenz durchgeführt wurden. Die zweite große Fachkonferenz, die gemeinsam mit der IUVA organisiert wurde, war die **ICULTA**, die virtuell stattfand:

Nach 20 Jahren wieder in Deutschland – die ISLC2021 in Potsdam

Mehr als 100 internationale Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zog es auf die fünftägige International Semiconductor Laser Conference (ISLC) 2021 vor Ort nach Potsdam. Etwa die gleiche Anzahl von Interessierten schaltete sich täglich online dazu, um mehr über aktuelle Entwicklungen bei Halbleiterlasern, Verstärkern und LEDs zu erfahren. Leiter Paul Crump hatte die Konferenz federführend als General Chair organisiert, unterstützt von einem 10-köpfigen Team aus dem FBH.

Die Hybrid-Konferenz war die zweite Präsenzveranstaltung der Laser-Community seit Beginn der Corona-Krise. Entsprechend hoch war die Nachfrage. Die Konferenz in Präsenz war restlos ausgebucht, weiteren Interessierten musste sogar abgesagt werden. Gleiches galt für die begleitende Ausstellung. Die Teilnehmenden äußerten sich begeistert über den direkten fachlichen Austausch vor Ort. Auch die Übertragung der gestreamten Vorträge und Diskussionen funktionierte reibungslos. Dank des hybriden Formats waren es fast genauso viele Vorträge und Teilnehmende wie vor der Corona-Pandemie.



The ISLC2021 conference was held for the first time as a hybrid format in Potsdam.
Die ISLC2021-Konferenz fand erstmalig als hybrides Format in Potsdam statt.

ICULTA 2021

UV LED Technologies & Applications

Sponsors: aquaSense, LASER COMPONENTS, OSRAM

Statistics		Program	
Continent	Attendees	Plenary talks	9
Europe	192 (61 %)	Invited talks	14
North America	93 (29 %)	Contributed talks	26
Asia	27 (8.4 %)	Posters	26
Australia	4 (1.2 %)	Exhibitors	10
South America	2 (0.6 %)		
Total	321		

ICULTA 2021
sponsored by aquaSense LASER COMPONENTS OSRAM

Attending countries: 33
Germany, United States, Canada, Ireland, United Kingdom, Japan, Taiwan, Italy, France, Switzerland, Australia, China, Denmark, Hungary, Israel, Norway, Spain, Austria, India, Mexico, Netherlands, Portugal, Belgium, Chile, Ecuador, Finland, Iran, Korea, Monaco, New Zealand, Poland, Saudi Arabia, Sweden

ICULTA – again forum for the international LED community

For the second time, ICULTA – the "International Conference on UV LED Technologies & Applications" – offered the UV LED community a forum for professional exchange in April 2021. The virtual conference brought together the world's leading manufacturers, users, and researchers in this field. It addressed the latest developments in UV LED manufacturing, including applications in healthcare, environment and life sciences, polymer curing, and metrology. It also focused on how UV radiation can be used to combat COVID-19, particularly in the disinfection of air and surfaces.



ICULTA 2021 was jointly organized by the German consortium Advanced UV for Life, based at the Ferdinand-Braun-Institut, and the International Ultraviolet Association (IUVA). FBH itself presented advances in the reliability of UVB and UVC LEDs. It also introduced emitters that are already being tested in medical applications, for example to combat multi-resistant pathogens in medical applications.

Oliver Lawal, CEO of Aquisense Technologies during the ICULTA closing session.

Oliver Lawal, Vorstand von Aquisense Technologies bei der Abschlussveranstaltung der ICULTA.

ICULTA – erneut Forum für die internationale LED-Community

Zum zweiten Mal bot die ICULTA – die "International Conference on UV LED Technologies & Applications" – im April 2021 der UV-LED-Community ein Forum für den fachlichen Austausch. Die virtuelle Konferenz brachte die weltweit führenden Hersteller, Anwender und Forscher aus diesem Bereich zusammen. Sie beschäftigte sich mit den neuesten Entwicklungen in der UV-LED-Fertigung, einschließlich Anwendungen in den Bereichen Gesundheitswesen, Umwelt und Biowissenschaften, Härtung von Polymeren und Messtechnik. Im Fokus stand dabei auch, wie sich mit UV-Strahlung COVID-19 bekämpfen lässt, insbesondere bei der Desinfektion von Luft und Oberflächen.

Die ICULTA 2021 wurde gemeinsam vom deutschen Konsortium Advanced UV for Life, das am Ferdinand-Braun-Institut angesiedelt ist, und der 'International Ultraviolet Association' (IUVA) organisiert. Das FBH selbst präsentierte seine Fortschritte bei der Zuverlässigkeit von UVB- und UVC-LEDs. Es stellte zudem Strahler vor, die bereits in medizinischen Anwendungen getestet werden, etwa um multiresistente Erreger in medizinischen Anwendungen zu bekämpfen.

Further conferences & trade fairs

Expert conferences in the field of III-V electronics were only held virtually in 2021. The **European Microwave Week (EUMW)**, for example, was postponed from 2020 to January 2021 and ultimately held completely digitally. FBH was represented in three workshops and with seven conference presentations. Olof Bengtsson organized the workshop "High-efficiency linear power amplifiers for high bandwidth, high PAR signals" with Prof. Zoya Popovic (University in Boulder/Colorado, USA), Viktor Krozer and Ralf Doerner the workshop "Sub-mmWave On-Wafer Measurements". In parallel, FBH exhibited at the virtual booth of the Research Fab Microelectronics Germany. FBH was similarly well represented at the virtual **International Microwave Symposium** in June.

Conferences in the field of photonics were also staged virtually. **Photonics West** in the USA, for example, was held digitally in March – FBH was involved with 14 streamed talks. **CLEO Europe** was as well conducted digitally in June. With seven contributions, FBH was also well represented at this conference. The **LASER World of Photonics** trade show, which is usually taking place in parallel, was postponed by one year and was held in April 2022 in on-site presence. FBH exhibited at the Berlin-Brandenburg joint booth and was pleased about the lively interest of the international trade fair visitors.

In October 2021, FBH exhibited its capabilities in diode lasers and UV LEDs at the digital **Photonics Days Adlershof**. Just one month later, FBH presented its semiconductors for space and quantum technologies – this time on site – at the Berlin-Brandenburg joint booth at **Space Tech Expo** trade fair in Bremen. Exhibits included laser systems for quantum optical precision experiments, pump laser sources for satellite applications, and energy-efficient components for satellite communications and sensors.



Die Fachkonferenzen im Bereich der III/V-Elektronik fanden 2021 lediglich virtuell stand. So wurde die **European Microwave Week (EUMW)** von 2020 auf Januar 2021 verschoben und letztlich vollständig digital durchgeführt. Das FBH war in drei Workshops und mit sieben Konferenzvorträgen vertreten. Olof Bengtsson organisierte mit Prof. Zoya Popovic (Universität in Boulder/Colorado, USA) den Workshop "High-efficiency linear power amplifiers for high bandwidth, high PAR signals", Viktor Krozer und Ralf Doerner den Workshop "Sub-mmWave On-Wafer Measurements". Parallel stellte das FBH auf dem virtuellen Messestand der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland aus. Ähnlich gut war das FBH auf dem virtuellen **International Microwave Symposium** im Juni vertreten.

Auch im Bereich der Photonik waren die Konferenzen virtuell. So fand die **Photonics West** in den USA im März digital statt – das FBH war mit 14 gestreamten Vorträgen dabei. Auch die **CLEO Europe** wurde im Juni digital durchgeführt. Mit sieben Beiträgen war das FBH auch auf dieser Fachkonferenz gut vertreten. Die üblicherweise parallel stattfindende Fachmesse **LASER World of Photonics** wurde um ein Jahr verschoben und fand im April 2022 wieder in Präsenz statt. Das FBH stellte auf dem Berlin-Brandenburger Gemeinschaftsstand aus und freute sich über das rege Interesse der internationalen Fachbesucher.

Im Oktober 2021 zeigte das FBH seine Leistungsfähigkeit bei Diodenlasern und UV-LEDs auf den digital stattfindenden **Photonics Days Adlershof**. Nur einen Monat später präsentierte das FBH – dieses Mal vor Ort – am Berlin-Brandenburger Gemeinschaftsstand auf der Fachmesse **Space Tech Expo** in Bremen seine Halbleiter für Space und Quantentechnologien. Zu den Exponaten zählten Lasersysteme für quantenoptische Präzisionsexperimente, Pumplaserquellen für Satellitenanwendungen sowie energieeffiziente Komponenten für Satellitenkommunikation und -sensorik.

Spectroscopy module for optical frequency references – one of the exhibits at Space Tech Expo. Spektroskopie-Modul für optische Frequenzreferenzen – eines der Exponate bei der Space Tech Expo.

Other Events

Sonstige Veranstaltungen

FMD digital conference on technological sovereignty

After three years of setting up, the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) celebrated the transition to regular operation with the digital conference "Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial – Köpfe & Know-how" in April 2021. The cross-institutional association of 13 research institutes in the fields of microelectronics and nanoelectronics presented its comprehensive range of services to an interested audience of experts from science, politics and industry. More information can be found on p.42.

FBH at Leibniz in the Bundestag

As part of the annual dialogue format "Leibniz in the Bundestag", the Leibniz Association brought scientists together with members of the German Bundestag for individual discussions for the 13th time in 2021. FBH also participated together with the Research Fab Microelectronics Germany (FMD). Andreas Grimm (more information about him can be found on p.44) together with Stephan Guttowski, Head of the FMD office, informed members of the Bundestag about the opportunities for German microelectronics in global competition and about questions of technological sovereignty.

Digitalkonferenz der FMD zu technologischer Souveränität

Nach drei Jahren des Aufbaus feierte die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) mit der Digitalkonferenz „Impulsgeber FMD: Angebot & Potenzial – Köpfe & Know-how“ im April 2021 den Übergang in den Regelbetrieb. Der institutsübergreifende Zusammenschluss von 13 Forschungsinstituten aus Mikro- und Nanoelektronik stellte dabei sein umfassendes Angebot einem interessierten Fachpublikum aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft vor. Mehr Informationen dazu finden sich auf S. 45.

FBH bei Leibniz im Bundestag

Im Rahmen des alljährlichen Dialogformats „Leibniz im Bundestag“ brachte die Leibniz-Gemeinschaft 2021 zum 13. Mal Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit Abgeordneten des Deutschen Bundestags zu individuellen Gesprächen zusammen. Auch das FBH hat sich zusammen mit der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) daran beteiligt. Andreas Grimm (mehr Infos zu seiner Person gibt es auf S. 44) hatte gemeinsam mit Stephan Guttowski, dem Geschäftsstellenleiter der FMD, Bundestagsabgeordnete zu Chancen der deutschen Mikroelektronik im globalen Wettbewerb und zu Fragen technologischer Souveränität informiert.



- Experimenting with a steady hand – during Girls' Day 2021. Experimentieren mit Fingerspitzengefühl – beim Girls' Day 2021.



- Colleagues from FBH informing interested visitors about current developments from the institute during Science Week in the Museum für Naturkunde. Kolleginnen aus dem FBH informierten Interessierte über aktuelle Entwicklungen aus dem Institut bei der Science Week im Naturkundemuseum.

Girls' Day & Science Week

In 2021 and 2022, FBH again hosted Girls' Day with six girls each year. They spent a "day as a microtechnologist" and were delighted to experience hands-on research on site. This was also the case in November 2021 during Science Week Campus at the Museum für Naturkunde in Berlin. FBH presented its work together with partners from Adlershof at a joint booth and showed, among other things, its UV-LED irradiation system, which – depending on the wavelength – is used for the disinfection of surfaces, objects or skin. Book a Scientist and the QTX-5 workshop on quantum technologies were also offerings within Berlin Science Week.

Girls' Day & Science Week

2021 und 2022 hat das FBH den Girls' Day wieder mit jeweils sechs Mädchen durchgeführt. Sie erlebten einen „Tag als Mikrotechnologin“ und freuten sich, vor Ort Forschung zum Anfassen zu erleben. Das gab es auch im November 2021 beim Science Week Campus im Berliner Naturkundemuseum Berlin. Das FBH präsentierte sich gemeinsam mit Partnern aus Adlershof auf einem Gemeinschaftsstand und zeigte dort unter anderem sein UV-LED-Bestrahlungssystem, das – je nach Wellenlänge – für die Desinfektion von Oberflächen, Gegenständen oder Haut eingesetzt wird. Auch Book a Scientist und der Workshop QTX-5 zu Quantentechnologien waren Angebote im Rahmen der Berliner Science Week.



Tim Schröder at Book a Scientist

Tim Schröder, Head of the Joint Lab Diamond Nanophotonics, has already participated three times in the speed dating with science event. At the Leibniz Association initiative, interested parties can book one-on-one meetings with scientists. The dates of his offer "Technology with glamour factor – what diamonds have to do with quantum technologies" were quickly booked out. And he is enthusiastic about sharing his science: "From a librarian to a computer science student to a member of the Bundestag, the interests and prior knowledge are very different. Getting involved is exciting and it's tremendous fun."

Tim Schröder bei Book a Scientist

Bereits drei Mal hat sich Tim Schröder, Leiter des Joint Labs Diamond Nanophotonics, beim Speeddating mit der Wissenschaft beteiligt. Bei der Veranstaltung der Leibniz-Gemeinschaft können Interessierte Einzelgespräche mit Wissenschaftler*innen buchen. Die Termine seines Angebots „Technologie mit Glamourfaktor – was Diamanten mit Quantentechnologien zu tun haben“, waren jedenfalls schnell ausgebucht. Und er selbst ist begeistert davon, seine Wissenschaft zu teilen: „Von der Bibliothekarin über den Informatikstudierenden bis hin zu einem Mitglied des Bundestags, die Interessen und das Vorwissen sind sehr unterschiedlich. Sich darauf einzulassen ist spannend und es macht riesigen Spaß.“

Events to secure the next generation of professionals in the high-tech sector

Parents on Tour (**Eltern auf Tour** – on site) and Training Wanted (**Ausbildung gesucht** – digital) gave parents and their children insights into various occupational fields. At FBH, they learned about the requirements and prospects of an apprenticeship in microtechnology, industrial mechanics and information technology. These and other activities aimed at getting young people interested in training in high technology are organized by the High-Technology Training Network (ANH Berlin).

ANH Berlin also provided information about job paths in the high-tech sector at training fairs – both digitally and on site. For this purpose, the ANH team was active at events including **#seiDUAL** and the **Vocatium** training fair. Moreover, the colleagues organized the Adlershof Training Alliance (**Ausbildungs-Allianz Adlershof** – digital).

Events zur Nachwuchssicherung im Hightech-Bereich

Bei **Eltern auf Tour** (vor Ort) und **Ausbildung gesucht** (digital) bekamen Eltern und ihre Kinder Einblicke in verschiedene Berufsfelder. Am FBH informierten sie sich so über Inhalte und Chancen einer Ausbildung in der Mikrotechnologie, Industriemechanik und Fachinformatik. Diese und weitere Aktivitäten, die junge Menschen für eine Ausbildung in der Hochtechnologie begeistern sollen, organisiert das Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie (ANH Berlin).

Auch auf Ausbildungsmessen – sowohl digital als auch vor Ort – informierte ANH Berlin über Ausbildungswege im Hightech-Bereich. Dazu war das ANH-Team unter anderem auf Veranstaltungen wie **#seiDUAL** sowie auf der Ausbildungsmesse **Vocatium** aktiv und organisierte die **Ausbildungs-Allianz Adlershof** (digital).

Another focus is on companies that train or are willing to engage in vocational training. In the online workshop **BM = x³** – new impulses for the development of skilled workers, ANH Berlin discussed demand-oriented offers with interested companies in order to develop personnel in a targeted manner and to make customized further training available. The network also provided information about flexible training modules that will be offered in the future through the supra-regional vocational training academy. Further information on training activities is available on p. 19.

Ein weiterer Fokus liegt auf auszubildenden beziehungsweise ausbildungswilligen Unternehmen. Im Online-Workshop **BM = x³** – neue Impulse für die Fachkräfteentwicklung diskutierte ANH Berlin mit interessierten Firmen über bedarfsgerechte Angebote, um Personal gezielt zu entwickeln und maßgeschneidert weiterzubilden. Das Netzwerk informierte zudem über flexible Bildungsmodule, die künftig über die überregionale Berufsbildungsakademie bereitgestellt werden. Weitere Informationen zu den Ausbildungsaktivitäten gibt es auf S. 19.



FBH sporty

FBH was again athletically active in 2021 and competed with three teams in the Adlershof company relay. They finished 4th, 31st and 55th out of a total of 103 teams.

FBH sportlich

Auch 2021 war das FBH wieder sportlich aktiv und ist gleich mit drei Teams bei der Adlershofer Firmenstaffel angetreten. Sie belegten die Plätze 4, 31 und 55 von insgesamt 103 Teams.

- The FBH running teams 2021 at the Adlershof company relay. Die Lauf-Teams 2021 des FBH bei der Adlershofer Firmenstaffel.





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 21,000 people. The financial volume amounts to more than 1.9 billion euros.

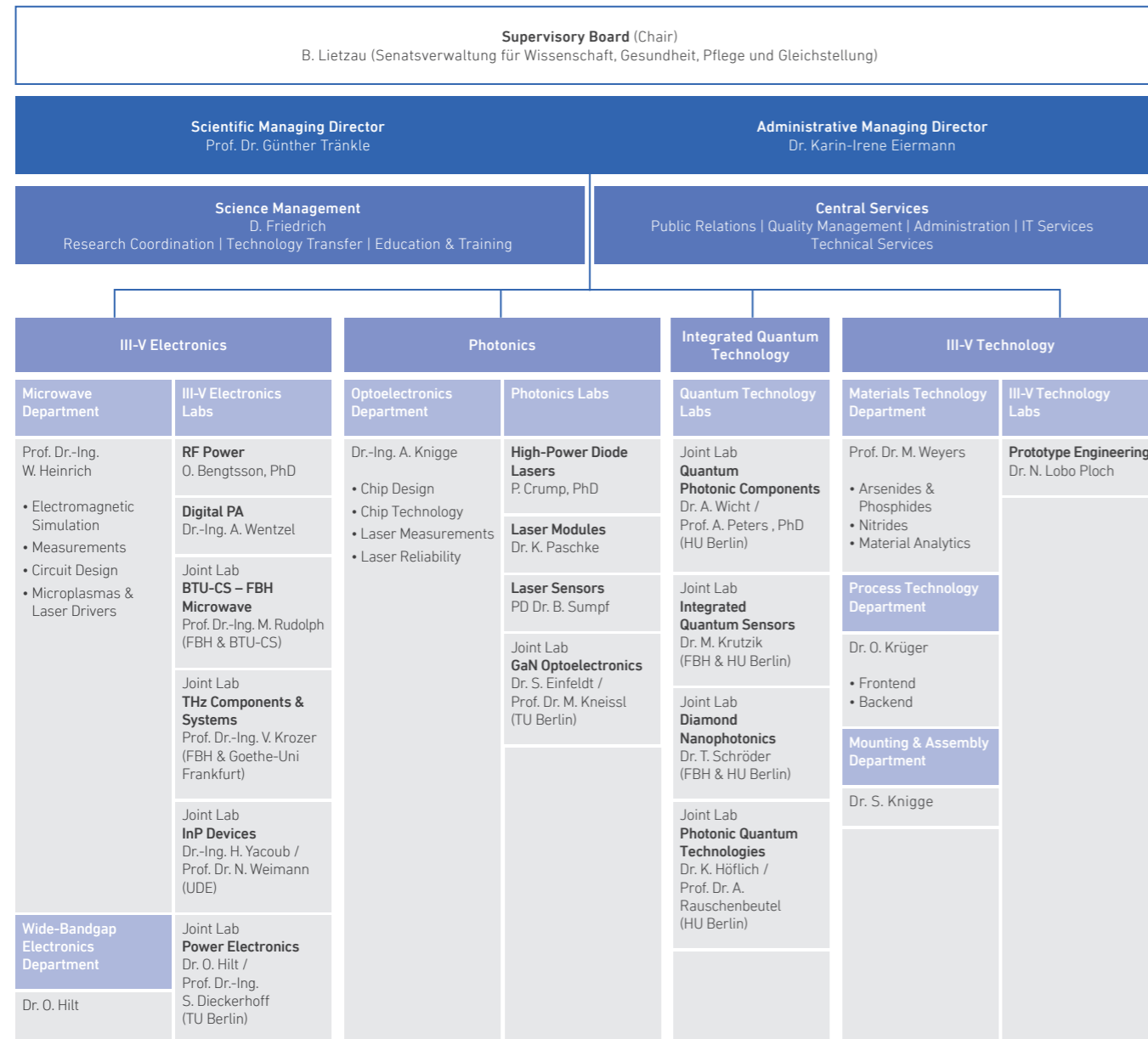
Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organisiert seine Forschungsaktivitäten in Labs und Departments in den vier Forschungsbereichen Photonik, integrierte Quantentechnologie, III/V-Elektronik und III/V-Technologie. Hierbei kooperiert das FBH im Rahmen von Joint Labs 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 knapp 21.000 Personen. Der Gesamtetat liegt bei mehr als 1,9 Milliarden Euro

Organizational chart

Organigramm



Scientific advisory board

Wissenschaftlicher Beirat

Chair | Vorsitz

Dr. Patrick Scheele
 HENSOLDT Sensors GmbH, Ulm

Members | Mitglieder

- | | |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bösch
Technische Universität Graz (A) | Dr. Kolja Nicklaus
Space Tech GmbH, Immenstaad |
| Dr. Franz Dielacher
Villach (A) | Dr. Berthold Schmidt
TRUMPF Photonic Components GmbH, Ulm |
| Prof. Dr. Friedel Gerfers
Technische Universität Berlin | Dr. Ulrich Steegmüller
Aledia, Échirolles (FR) |
| Prof. Dr. Ulrike Grossner
ETH Zürich (CH) | Prof. Jelena Vuckovic
Stanford University (USA) |
| 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, Pflege und Gleichstellung

Members | Mitglieder

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth
Universität Stuttgart | Melanie Rüter
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(as of/seit 15.02.2022) |
| Dr. Ramona Eberhardt
Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena | Dr. Christian Schmitz
TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen |
| Dr. Annika Lange
Senatsverwaltung für Finanzen, Berlin | Dr. Herbert Zeisel
Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
(until/bis 15.02.2022) |
| Sylvia Richter
Infineon Technologies AG, Neuburg | |

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. 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 |
Assistentin der Administrativen Geschäftsführerin
Dr. Sabine Spohner

Phone +49.30.6392-58005
sabine.spohner@fbh-berlin.de

Public Relations | Öffentlichkeitsarbeit
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. 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. Andreas Wicht

Phone +49.30.6392-3958
andreas.wicht@fbh-berlin.de

III-V Technology | III/V-Technologie
Prof. Dr. 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
 Fax +49.30.6392-2602
 Email fbh@fbh-berlin.de
 Web www.fbh-berlin.de

All rights reserved. Reproduction requires permission of the Directors of the Institute. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck nur mit Genehmigung der Geschäftsführung.

© Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Berlin
 08/2022

Editor | Redaktion
 Petra Immerz

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

K. Bilo: p. 2
 C. Ruß: p. 6
 M. Baumbach: pp. 7, 8, 14, 18, 20, 22, 39, 40 (bottom), 123, 124, 140, 145, 147
 P. Immerz: pp. 16, 23, 26, 27, 28, 29, 32, 40 (top), 52, 54, 56, 57, 58, 78, 85, 122, 128 (right), 129, 131, 135
 freepik: pp. 24, 30
 B. Schurian: pp. 31, 38, 66, 68, 69 (insets), 76
 Charité Universitätsmedizin Berlin: p. 33
 Silicon Radar: p. 34
 CNES/Illustration D. Ducros: p. 35
 Robo Technology: p. 36
 Uni Aveiro/Efacec: p. 37
 Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland: pp. 42, 43
 Fraunhofer Mikroelektronik: p. 44
 JENOPTIK: pp. 46, 49
 TOPTICA eagleyard: pp. 47, 48
 G. Gurr: p. 51
 N. Vlach: pp. 63, 72, 133, 137 (bottom)
 K. Sowoidnich: p. 75
 HU Berlin: pp. 88, 89, 90
 Deutscher Bundestag/T. Trutschel – Photothek: p. 136
 S. Harms: p. 137 (top)
 B. Dermeik: p. 139 (bottom)
 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
<https://www.fbh-berlin.de>