

**ANNUAL
REPORT
JAHRES
BERICHT**



2020 | 2021

**ANNUAL
REPORT**
JAHRES
BERICHT

Editorial

Vorwort

New impulses

There is nothing as constant as change ... This is also true for the Ferdinand-Braun-Institut, which started the year 2021 as an independent gGmbH. With the new corporate form, we are creating the optimal setting for our application-oriented research – with flexible structures tailored to the needs of our customers and partners from industry and science. As an industry-related institute, we can thus respond quickly and proactively to customer inquiries from all over the world.

We consider ourselves well equipped to continue the successful course of recent years. Despite Corona, we were able to close the 2020 financial year very successfully. We achieved a significant increase in industrial revenues, which nearly doubled to 9.8 million euros compared to the previous year. Our research is bringing solutions that address socially relevant topics into application. These include developments on UVC light-emitting diodes, with which Sars-CoV-2 viruses and multi-resistant pathogens can be combated directly on humans in the future. Our diode lasers achieve worldwide unique results, among others in beam quality and output powers. They are therefore just as much in demand for direct material processing as they are as pump lasers. We are supplying laser modules, for example, for the Franco-German Merlin satellite, which will be used to investigate and monitor the concentration of the greenhouse gas methane.

In the emerging field of quantum technologies, we are a supplier of essential key components and are bridging the gap between basic and application-oriented research with four joint labs – with success. FBH realizes 50 robust laser modules featuring an extremely narrow linewidth as part of a research project funded by DLR. The modules will be used in experiments on board the International Space Station ISS.

Our research and development on RF power modules, power electronic switching transistors and terahertz electronics target next-generation communication standards (5G, 6G), trustworthy electronics and green ICT applications, among others. To this end, we are joining forces with strategic partners: Within the frame-



Neue Impulse

Nichts ist so beständig wie die Veränderung ... Das gilt auch am Ferdinand-Braun-Institut, das als selbstständige gGmbH ins Jahr 2021 gestartet ist. Mit der neuen Gesellschaftsform schaffen wir den optimalen Rahmen für unsere anwendungsorientierte Forschung – mit flexiblen Strukturen, die auf die Bedürfnisse unserer Kunden und Partner aus Industrie und Wissenschaft zugeschnitten sind. Als industrienahes Institut können wir so schnell und proaktiv auf die Anfragen aus aller Welt reagieren.

Wir sehen uns gut gerüstet, um den Erfolgskurs der letzten Jahre fortzuschreiben. Trotz Corona konnten wir das Geschäftsjahr 2020 sehr erfolgreich abschließen. Ein deutliches Plus verzeichnen wir bei den Industrieerträgen, die wir mit 9,8 Millionen Euro gegenüber dem Vorjahr beinahe verdoppelt haben. Unsere Forschung bringt Lösungen für gesellschaftlich relevante Themen in die Anwendung. Dazu zählen Entwicklungen zu UVC-Leuchtdioden, mit denen sich Sars-CoV-2-Viren und multiresistente Krankheitserreger künftig direkt am Menschen bekämpfen lassen. Unsere Diodenlaser erreichen weltweit einzigartige Ergebnisse, unter anderem bei der Strahlgröße und bei den Ausgangsleistungen. Sie sind daher in der direkten Materialbearbeitung ebenso gefragt wie als Pump-laser. So liefern wir beispielsweise Lasermodule für den deutsch-französischen Satelliten Merlin, mit dem künftig die Konzentration des klimaschädlichen Methangases untersucht und überwacht werden soll.

Im zukunftsorientierten Bereich der Quantentechnologien etablieren wir uns als Lieferant für die benötigten Schlüsselkomponenten und schlagen mit vier Joint Labs die Brücke zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung – mit Erfolg. Das FBH realisiert im Rahmen eines vom DLR geförderten Forschungsvorhabens 50 extrem schmalbandige und robuste Lasermodule. Diese werden bei Experimenten an Bord der internationalen Raumstation ISS zum Einsatz kommen.

Unsere Forschung und Entwicklung zu HF-Leistungsmodulen, leistungselektronischen Schalttransistoren und Terahertz-

work of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD), for example, we are contributing as one of 13 member institutes to securing Germany's technological sovereignty in one of the key technologies of the 21st century.

More space for research – with more brainpower

Almost 30 years ago, the Ferdinand-Braun-Institut started with 88 colleagues – a success story, since we now employ more than 350 experts. We are currently working on about 250 ongoing projects per year. For this purpose, we now have a state-of-the-art high-tech infrastructure in place. With around 34 million euros provided by the BMBF as part of the FMD, we have acquired high-performance large-scale equipment for semiconductor production. We installed these systems in our second cleanroom, covering 1,000 square meters of laboratory space. Thanks to funding provided by the State of Berlin and the European Regional Development Fund (ERDF), we were able to create the necessary technical conditions for the equipment. I want to take this opportunity to express my sincere thanks for the generous support from our federal and state sponsors. This enables us to lay the foundation for internationally competitive R&D results that are needed as key components in a wide range of applications – from medical technology, materials processing and sensor technology to communications and quantum technologies.

With FMD, we are also part of a high-performance, collaborative network structure that offers customers from industry and science cross-institutional R&D services. During the years of its establishment, the member institutes have developed a comprehensive, demand-oriented range of services for companies and research partners. FMD now offers customers – explicitly also small and medium-sized enterprises – easy access to high-quality research services as a one-stop shop.

I would like to take this opportunity to thank our customers and partners, most of whom we have worked with in a spirit of trust for many years. We are looking forward to the many more exciting projects to come! Last but not least, I like to thank the employees of our institute, whose know-how and commitment ensure top-class results. They are the basis for the success of our institute.

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

Günther Tränkle

Elektronik zielen unter anderem auf Kommunikationsstandards der nächsten Generation (5G, 6G), vertrauenswürdige Elektronik und Green-ICT-Anwendungen. Dabei bündeln wir unsere Kräfte mit strategischen Partnern: Im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) etwa helfen wir als eines von 13 Mitgliedsinstituten, die Technologiesouveränität Deutschlands in einer der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts zu sichern.

Mehr Raum für Forschung – mit mehr Köpfen

Vor fast 30 Jahren ist das Ferdinand-Braun-Institut mit 88 Kolleginnen und Kollegen gestartet – eine Erfolgsgeschichte, denn heute gehören mehr als 350 Fachkräfte zu uns. Aktuell bearbeiten wir etwa 250 laufende Projekte pro Jahr. Dafür steht uns inzwischen eine Hightech-Infrastruktur auf dem neuesten technologischen Stand zur Verfügung. Mit rund 34 Millionen Euro, die das BMBF im Rahmen der FMD bereitgestellt hat, haben wir hochleistungsfähige Großanlagen für die Halbleiterfertigung beschafft. Diese Anlagen haben wir in unserem zweiten Reinraum mit 1.000 Quadratmetern Laborfläche installiert. Die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen konnten wir dank der Förderung des Landes Berlin und dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) schaffen. Für die großzügige Förderung unserer Geldgeber von Bund und Land bedanke ich mich an dieser Stelle sehr herzlich. Damit schaffen wir die Voraussetzungen für international wettbewerbsfähige F&E-Ergebnisse, die in vielfältigen Anwendungen als Schlüsselkomponenten benötigt werden – von Medizintechnik, Materialbearbeitung und Sensorik bis hin zu Kommunikation und Quantentechnologien.

Mit der FMD sind wir zudem an einer leistungsfähigen, vernetzten Kooperationsstruktur beteiligt, die Kundinnen und Kunden aus Industrie und Wissenschaft institutsübergreifend F&E-Dienstleistungen bietet. In den Jahren des Aufbaus haben die Mitgliedsinstitute ein umfassendes, bedarfsorientiertes Angebot für Unternehmen und Forschungspartner erarbeitet. Inzwischen bietet die FMD Kunden – explizit auch kleinen und mittelständischen Unternehmen – als One-Stop-Shop unkomplizierten Zugang zu hochwertigen Forschungsservices.

Ich danke an dieser Stelle unseren Kunden und Partnern – mit den meisten arbeiten wir seit langen Jahren vertrauensvoll zusammen. Wir freuen uns über die vielen weiteren spannenden Projekte, die noch kommen werden! Nicht zuletzt gilt mein Dank den Mitarbeitenden unseres Instituts, die mit ihrem Know-how und Einsatz für hochkarätige Resultate sorgen. Sie sind die Basis unseres Erfolgs.

Die Ergebnisse und Ereignisse des letzten Jahres haben wir hier zusammengefasst. Eine anregende Lektüre wünscht Ihnen,

Table of contents

Inhaltsverzeichnis

6 Profile Profil

- 15 Making research usable – Prototype Engineering Lab
Forschung nutzbar machen – das Entwicklungszentrum
- 19 Skilled workers in high technology
Fachkräfte in der Hochtechnologie sichern

23 Highlights Schlaglichter

54 Photonics Photonik

- 56 High-brightness nanosecond-pulse operation from tapered ridge-waveguide lasers for LiDAR applications
- 58 Dual-wavelength lasers with excellent spatial and spectral beam properties for Raman spectroscopy and terahertz generation
- 60 Micro-integrated high-power infrared laser source for direct material processing
- 62 Small-sized 626 nm laser for miniaturizing quantum optical experiments
- 64 Laser diode benches for the climate satellite MERLIN
- 66 High-brightness broad-area diode lasers with enhanced self-aligned lateral structure for material processing applications
- 68 Advanced diagnosis of limits to high-power diode lasers: challenges from interfaces
- 70 Compact diode laser-based dual-wavelength light source at 532 nm for shifted excitation Raman difference spectroscopy
- 72 Towards UV LEDs with high reliability – the role of defects in terms of carrier recombination
- 74 Spectrally pure far-UVC LED irradiation system for skin-tolerant inactivation of multi-resistant pathogens
- 76 Single-mode DBR laser diodes in the blue-violet spectral region

78 Integrated Quantum Technology Integrierte Quantentechnologie

- 80 Fabrication and characterization of novel defect centers in diamond nanostructures for optical quantum technology
- 82 Ultra-narrow linewidth GaAs-based DBR lasers for spaceborne data transfer and optical atomic clocks
- 84 Automation of laser assembly processes – machine learning to align complex electro-optical setups

- 86 Development of micro-optical isolators based on $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ as the magneto-optical material
- 88 Compact optical frequency reference for technology demonstration on nanosatellites

90 III-V Electronics III/V-Elektronik

- 92 A wideband multi-port measurement system for 5G-MIMO and space applications
- 94 Improved modeling of trapping effects in GaN HEMTs with a physics-based compact model
- 96 Filling the gap – potential shifting driver amplifier suited to complete digital GaN-based signal chains
- 98 Broadband MMICs for applications at sub-THz frequencies
- 100 Highest sensitivity – AlGaIn/GaN THz FET detectors compared to Schottky barrier diode detectors and photoconductive antennas
- 102 Novel plastic bending methods using microwave heating for industrial applications
- 104 GaN-channel HEMTs with AlN buffer for high-voltage switching
- 106 Lateral $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ power transistors for high voltage switching applications
- 108 Optimizations in vertical gallium nitride transistors for laser driving applications

110 III-V Technology III/V-Technologie

- 112 Increased emission power of ultra-violet light-emitting diodes by nanopatterned sapphire substrates
- 114 Structural and electronic properties of highly doped GaAs:Te layers for the use in stacked laser diodes
- 116 Digitalization of cleanroom processes – introducing an MES in a research environment
- 118 Downsizing semiconductor chips – development of a highly precise soldering method using formic acid

121 Annex Anhang

- 122 Facts & Figures
Zahlen & Fakten
- 124 Personnel & Awards
Personalien & Auszeichnungen
- 126 Events
Veranstaltungen
- 131 Structure of the Institute
Institutsstruktur
- 134 Contact
Kontakt

Who we are – FBH at a glance

Wer wir sind – das FBH im Profil

The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut fuer Hoechsthfrequenztechnik (FBH) researches 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) erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern 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 & assembling

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
- Kurzweilige UV-Leuchtdioden, u.a. für Sensorik, Desinfektion, Medizin- und Produktionstechnik, ...

Integrierte Quantentechnologie

- Elektrooptische Komponenten & hybrid mikointegrierte Module
- Integrierte Quantensensoren auf Basis atomarer Gase
- Nanostrukturierte Diamantsysteme und -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 Institute 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. Building on the institute's research results, it develops user-friendly prototypes based on systematic device engineering that can be tested in industrial applications. With its multifaceted approach, the institute 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 with which FBH demonstrates its 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. The Twenty20 consortium of currently 50 partners researches and develops UV-LED technology along the entire value chain – from crystal to application in devices such as skin analysis.

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. Es entwickelt benutzerfreundliche Prototypen, die auf den Forschungsergebnissen basieren und dank der systematischen Geräteentwicklung unkompliziert in industriellen Anwendungen getestet werden können. Mit seinem breit gefächerten Ansatz stellt das Institut 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 Prototypen, mit denen das FBH seine Forschungsergebnisse in einsatzfähigen Geräten demonstriert. 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 derzeit 50 Partnern erforscht und entwickelt die UV-LED-Technologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette - vom Kristall bis zur Anwendung, beispielsweise für Geräte zur Hautanalyse.

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 RF electronics and photonics. 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 und Photonik. 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.

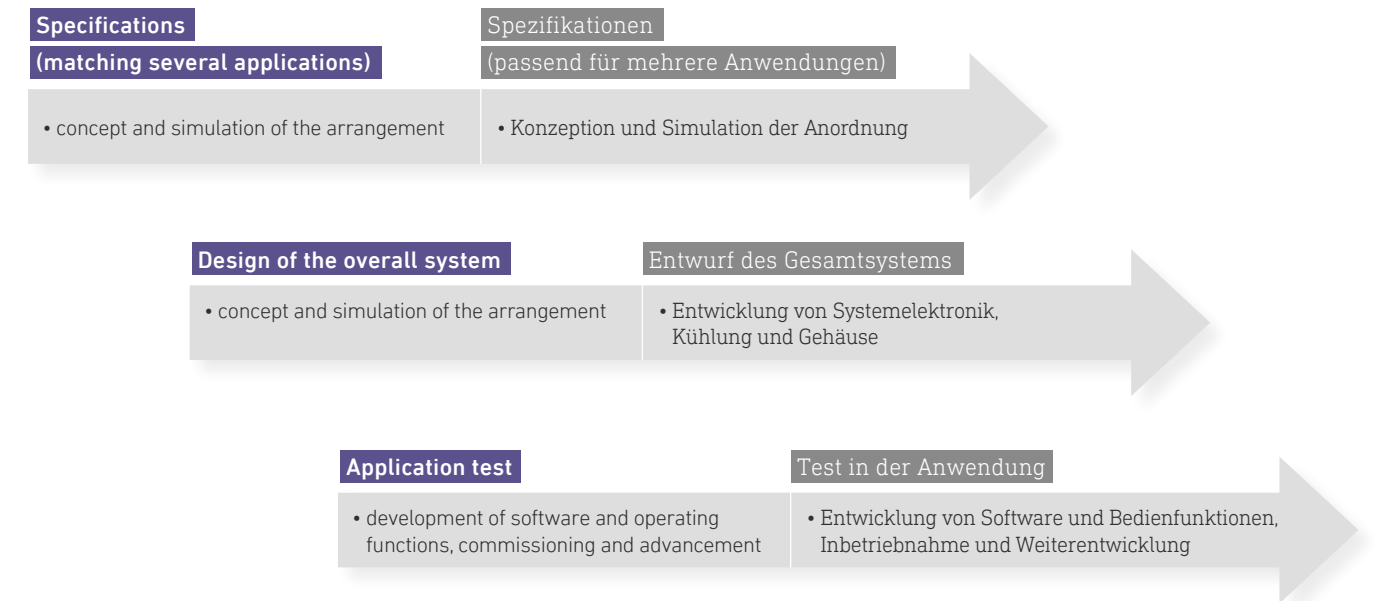


Hand in hand – making research usable

Hand in Hand – Forschung nutzbar machen

FBH's in-house Prototype Engineering Lab further develops research results and technologies so that they can be tested practically by customers and partners. The high level of integration of all components allows easy handling by non-specialist users – in simple plug & play operation.

From idea to prototype: Von der Idee zum Prototyp:



Integrating novel research modules into a prototype is technically challenging. In most cases, the exact specifications from the applications have not been fixed at the beginning. Therefore, operating parameters should be as variable as possible so that the prototype can be used flexibly. The device should also be compact and easy to operate even by personnel with little technical knowledge. Thus, prototype development does not end with the electronic-mechanical connection of the research modules, but has always the application and intuitive

operation in mind. Application examples can be found on pp. 28 and 32.

Each application has its own requirements. When integrating laser modules, for example, the arrangement of the laser in an optical path is crucial. Regarding LEDs, the light should often be distributed homogeneously across the target surface. To optimally position the various components as well as the required optics or reflectors, comprehensive simulations and



➤ Irradiation system with UVC LEDs used in the VIMRE project for medical tests on skin models and skin by Charité and Greifswald University Medical Center. Bestrahlungssystem mit UVC-LEDs, das im Projekt VIMRE für medizinische Tests an Hautmodellen und Haut von der Charité und der Universitätsmedizin Greifswald genutzt wird.

subsequent variations are carried out. The same applies to frequently required temperature control, which is individually manufactured using active or passive cooling elements. Since the cooling elements also serve as carriers for the research components they must be thermally optimally connected to them. Ultimately, the result is a small functional housing with a high-precision arrangement of all (opto)electronic and mechanical components. This is supplemented by a precisely fitting and space-saving power supply as well as microcontrollers that allow to precisely control the operating parameters. An FBH prototype accordingly offers an integrated power supply for all assemblies and gets by 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, FBH is developing a GUI (Graphical User Interface) application that is easy to understand for users to set and monitor the operating parameters. If required, wireless operation via tablet and integrated web server is also possible. All operating parameters optimized via the GUI can be saved in the prototype and are thus available in the future even without a computer connection.

Customized solutions for special challenges

One special development, for example, was the driver electronics for 60 LED pairs of an LED irradiation system. The flux voltages of all LEDs are monitored in order to adjust the optical power homogeneously and to replace individual LEDs in due time should degradation occur.

There can be also very different requirements for the control of pulsed FBH lasers. Often, in-house developed laser drivers are integrated. Programmable digital circuits (Field Programmable Gate Array – FPGA) can be used to achieve pulse lengths in the sub-nanosecond range, which the user can additionally vary in real time. Supplemented by an internal pulse trigger, the prototype can be used completely in stand-alone operation.

For another laser control, the number of current sources as well as the current intensity had to be individually adaptable to the laser configuration – while at the same time keeping losses in the drivers to a minimum. This could be achieved by a complex management of the laser drivers.



➤ Operating electronics of an LED irradiation system with 120 UVC LEDs on an individual heat sink, integrated with reflector box and display electronics. Betriebselektronik eines LED-Strahlers mit 120 UVC-LEDs auf einem individuellen Kühlkörper, integriert mit einem Reflektorkasten und Anzeigeelektronik.

➤ Laser control of ten flexible drivers with high resolution and option for parallel connection of different dual-wavelength lasers, which are cooled via a Peltier element and a large housing surface. Lasersteuerung von zehn flexiblen Treibern mit hoher Auflösung und Möglichkeit zur Parallelschaltung für verschiedene Zweiwellenlängen-Laser, welche mit Peltierelement und großer Gehäuseoberfläche gekühlt werden.

Der Weg zum Prototyp

Das hauseigene Entwicklungszentrum entwickelt Forschungsergebnisse und Technologien des FBH so weiter, dass sie von Kunden und Partnern praktisch getestet werden können. Die hohe Integrationstiefe aller Komponenten erlaubt die einfache Handhabung durch fachfremde Anwender – im einfachen Plug & Play-Betrieb.

Neuartige Forschungsmodule in einen Prototyp zu integrieren ist technisch anspruchsvoll. Meist stehen anfangs die exakten Spezifikationen aus den Anwendungen noch nicht fest. Daher sollen Betriebsparameter möglichst variierbar sein, damit der Prototyp flexibel eingesetzt werden kann. Das Gerät sollte zudem kompakt und auch von Personal ohne technische Vorkenntnisse einfach zu bedienen sein. Somit endet die Prototypen-Entwicklung nicht bei der elektronisch-mechanischen Anbindung der Forschungsmodule, sondern hat auch immer die Anwendung und intuitive Bedienung im Blick. Applikationsbeispiele finden sich auf S. 29 und 34.

Jede Anwendung hat ihre eigenen Anforderungen. So ist bei der Integration von Lasermodulen die Anordnung des Lasers in einer optischen Strecke von zentraler Bedeutung. Bei LEDs soll das Licht häufig homogen auf der Zielfläche verteilt werden. Die Positionierung der verschiedenen Komponenten sowie benötigter Optiken oder Reflektoren wird daher zunächst umfassend simuliert und variiert. Gleiches gilt für die häufig notwendige Temperaturregelung, die mit aktiven oder passiven Kühlelementen individuell gefertigt wird. Die Kühlelemente dienen als Träger der Forschungsbauteile und müssen thermisch optimal an diese angebunden werden. Am Ende entsteht ein kleines funktionales Gehäuse mit hochpräziser Anordnung aller (opto-)elektronischen und mechanischen Komponenten.



Ergänzt wird dies durch eine passgenaue und platzsparende Stromversorgung sowie Mikrocontroller, mit denen sich die Betriebsparameter exakt steuern lassen. Ein Prototyp aus dem FBH bietet daher eine integrierte Stromversorgung für alle Baugruppen und kommt mit einem handelsüblichen Stecker- oder Tischnetzteil aus.

Zu jeder Prototypenentwicklung gehört auch die Programmierung einer Software. Neben der Firmware der integrierten Mikroprozessoren entwickelt das FBH eine für den Anwender leicht verständliche GUI (Graphical User Interface) Applikation, um die Betriebsparameter einzustellen und zu überwachen. Bei Bedarf ist auch eine drahtlose Bedienung über Tablet und integrierten Webserver möglich. Sämtliche über die GUI optimierten Betriebsparameter können im Prototyp abgespeichert werden und stehen künftig auch ohne Rechneranbindung zur Verfügung.

Passgenaue Lösungen für spezielle Herausforderungen.

Eine Spezialentwicklung war beispielsweise die Treiberelektronik für 60 LED-Paare eines LED-Strahlers. Die Flussspannungen aller LEDs werden überwacht, um die optische Leistung homogen einzustellen und im Falle von Degradation einzelne Leuchtdioden rechtzeitig auszutauschen.

Auch die Anforderungen für die Steuerung von PulsLasern aus dem FBH können sehr unterschiedlich sein. Oft werden vom Institut selbst entwickelte Lasertreiber integriert. Mithilfe von programmierbaren digitalen Schaltkreisen („Field Programmable Gate Array“ – FPGA) lassen sich Pulslängen im untersten Nanosekunden-Bereich erzielen, die der Nutzer zudem in Echtzeit variieren kann. Ergänzt durch einen internen Pulstrigger kann der Prototyp vollständig im Stand-Alone-Betrieb genutzt werden.

Für eine andere Lasersteuerung sollten die Anzahl der Stromquellen ebenso wie die Stromstärken individuell an die Laserkonfiguration anpassbar sein – mit zugleich nur geringen Verlusten in den Treibern. Dies erforderte ein komplexes Management der Lasertreiber.



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.

The FBH is closely connected to universities and actively engaged in academic teaching and education. Twelve scientists of the institute currently teach at six 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, the institute provides 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.

Das FBH beteiligt sich aktiv an der akademischen Lehre und Bildung und ist eng mit Hochschulen vernetzt. Zwölf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts lehren derzeit an sechs 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 dualen Berufsausbildung bietet das FBH vier Ausbildungsplätze pro Jahr in der Mikrotechnologie an. Darüber hinaus bildet das Institut in zwei weiteren Berufen aus: Industriemechaniker*in und Fachinformatiker*in für Systemintegration.

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

ANH Berlin (Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie) was founded at FBH in 2007. As a supplementary structure, the network promotes vocational education and training in STEM (science, technology, engineering, mathematics) far beyond the scope of the institute. At its core, the ANH Berlin team supports companies and research institutes within the Photonics Cluster to ensure their technical workforce. Motivating suitable young people to consider vocational training within the high-tech sector remains a major challenge in this context. 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

The project $BM = x^3$, launched at the end of 2020, provides new stimuli for the network's activities and for vocational training in the high-tech sector. The name stands for attractive vocational training (**B**ildung) in **m**icro and nanotechnology through **ex**cellent professions, **ex**cellent places of learning and **ex**cellent collaborations. As key technologies, micro- and nanotechnologies create the prerequisites for innovations in e-mobility and material processing as well as for the Internet of Things and artificial intelligence. To keep up with technological change, the indus-

try needs top-quality and flexible vocational initial and further training that complement academic education at an equal level.

Within the next four years, eight transregional network partners will develop an open, decentralized vocational training academy under the leadership of ANH Berlin. This academy is specifically tailored to the highly diversified high-tech sector and is supplemented by a digital learning platform. Customized training will be provided through the platform both online and on-site, enabling skilled workers to expand their knowledge and increase their chances of career advancement.

At the press conference with Federal Minister of Education Anja Karliczek in November, the project was already met with great interest. Colleagues from FBH and the Regional Education Center in Itzehoe explained the innovative concepts of $BM = x^3$. The project also responds to the challenges resulting from digitalization, globalization and demographic change along with the associated transformations in the labor market.

$BM = x^3$ is one of 17 projects that won the BMBF competition "Shaping the future – innovations for excellent vocational education and training (InnoVET)" in a two-stage process against a total of 175 competitors.

Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie – ANH Berlin

Mit dem 2007 am FBH gegründeten Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie (ANH Berlin) wurde eine Struktur geschaffen, die die berufliche Bildung weit über das Institut hinaus stärkt. Im Kern unterstützt das Team von ANH Berlin Unternehmen und Forschungseinrichtungen im Cluster Optik und Photonik bei der Sicherung des gewerblich-technischen Nachwuchses. Geeignete Jugendliche für die duale Ausbildung im Hightech-Bereich zu begeistern, bleibt in diesem Zusammenhang eine große Herausforderung. Nach wie vor sind viele Berufsbilder zu wenig bekannt oder die Lehrinhalte werden als zu „trocken“ oder zu „anspruchsvoll“ eingeschätzt. ANH Berlin macht zukunftsweisende Berufe greifbar und ermöglicht Jugendlichen Einblicke 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

Neue Impulse für die Arbeit des Netzwerks und für die berufliche Bildung im Hightech-Bereich gibt das Ende 2020 gestartete Projekt $BM = x^3$. Der Name steht für attraktive berufliche **B**ildung in **M**ikro- und **N**anotechnologie durch **ex**zellente Berufe, **ex**zellente Lernorte und **ex**zellente Kooperationen. Als Schlüsseltechnologien schaffen Mikro- und Nanotechnologien die Voraussetzungen für Innovationen in E-Mobilität und Materialbearbeitung ebenso wie für das Internet der Dinge oder die Künstliche Intelligenz. Um mit dem technologischen Wandel Schritt halten zu können, benötigt die Branche eine hochwertige und flexible berufliche Aus- und Weiterbildung, die die akademische Bildung gleichwertig ergänzt.

In den kommenden vier Jahren entwickeln nun acht Verbundpartner unter Leitung von ANH Berlin eine überregionale Berufs-

- Federal Minister of Education and Research Anja Karliczek at the virtual meeting with the representatives of the InnoVET projects.
Bundesministerin für Bildung und Forschung Anja Karliczek beim virtuellen Treffen mit den Vertreter*innen der InnoVET-Projekte.



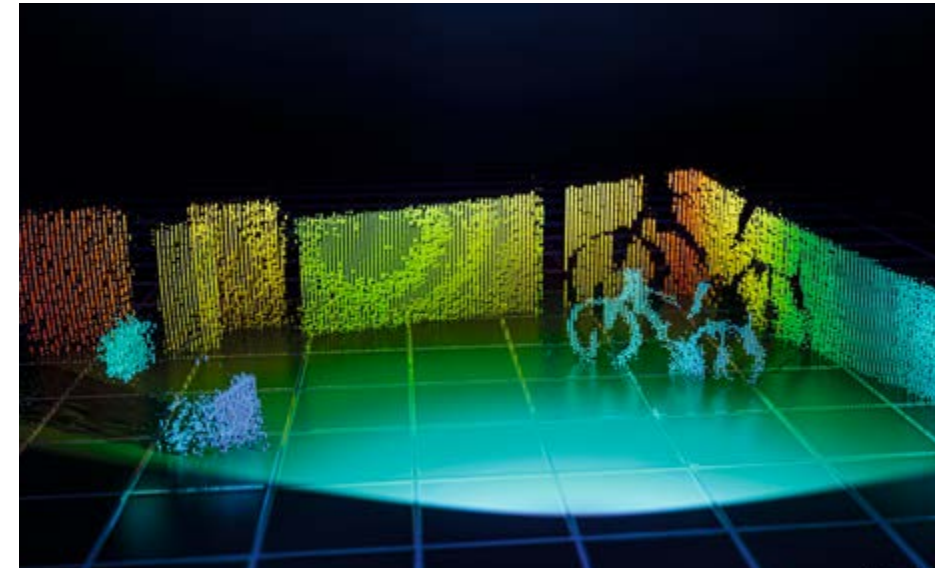
bildungsakademie, die speziell auf den stark diversifizierten Hochtechnologiebereich zugeschnitten ist. Unterstützt von einer Onlineplattform entwickeln die Partner flexible, maßgeschneiderte Weiterbildungsangebote, die digitale und Präsenzformate verbinden und mit denen Fachkräfte ihr Wissen erweitern und ihre beruflichen Aufstiegschancen erhöhen können.

Bei der Pressekonferenz mit Bundesbildungsministerin Anja Karliczek im November stieß das Vorhaben bereits auf großes Interesse. Kolleg*innen aus dem FBH und dem Regionalen Bildungszentrum in Itzehoe erläuterten die innovativen Konzepte von $BM = x^3$. Das Projekt berücksichtigt dabei auch die Herausforderungen infolge von Digitalisierung, Globalisierung und demographischem Wandel und die damit verbundenen Veränderungen am Arbeitsmarkt.

$BM = x^3$ hat sich als eins von 17 Projekten im Rahmen des BMBF-Wettbewerbs „Zukunft gestalten – Innovationen für eine exzellente berufliche Bildung (InnoVET)“ in einem zweistufigen Verfahren gegen insgesamt 175 Mitbewerber*innen durchgesetzt.



Highlights Schlaglichter



☛ In the OQmented test setup, objects were detected in a horizontal angle range of > 140 degrees at a distance of 25 meters.
Im Testaufbau von OQmented wurden Objekte in einem horizontalen Winkelbereich von > 140 Grad in 25 Metern Entfernung erkannt.

LiDAR laser module in practical use – 3D object detection in the close range

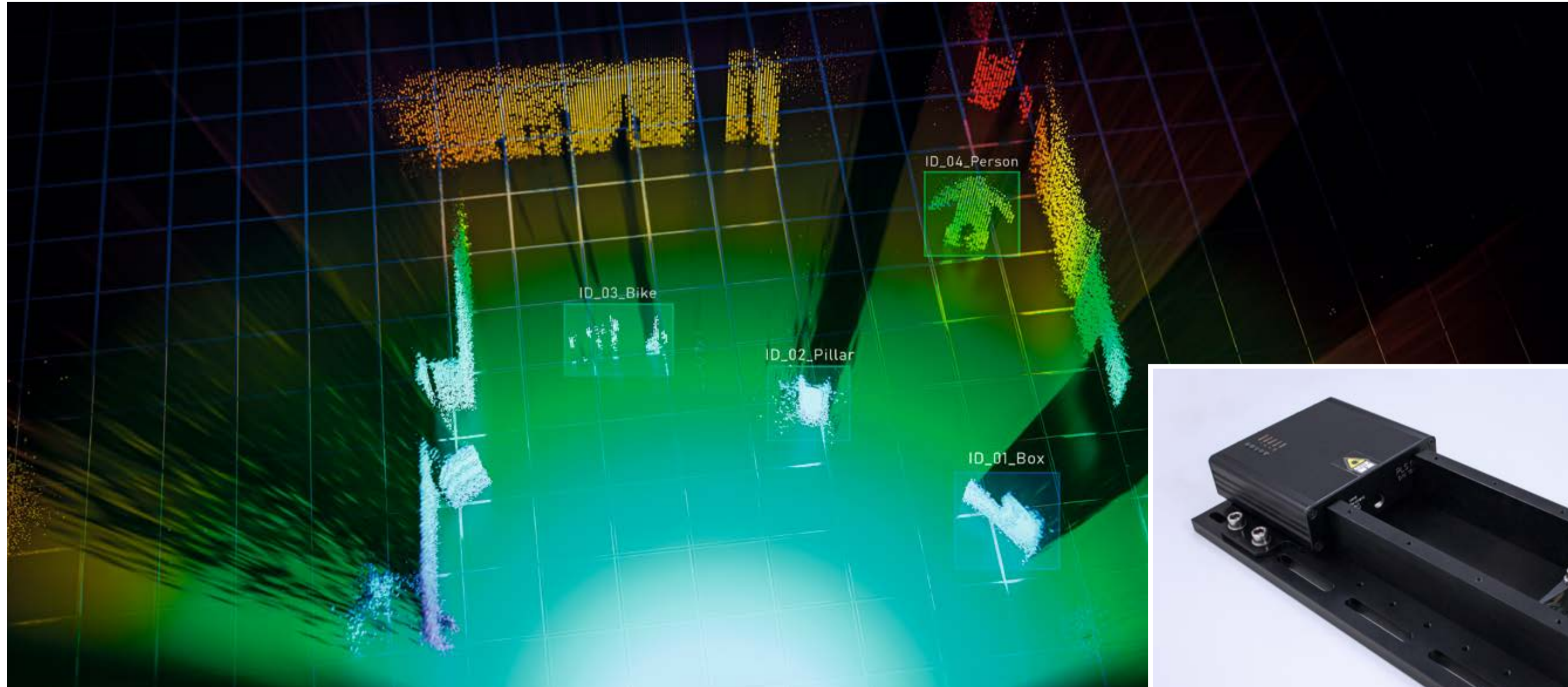
Reliable safety systems are essential for autonomous and semi-autonomous driving. However, common camera and radar systems are often unable to cope with difficult lighting conditions or complex traffic situations.

In 2020, the startup OQmented realized and successfully demonstrated an overall LiDAR system for near-range 3D object detection. The system even works in glaring sunlight and scores with reduced system complexity. In a test setup, objects including a bicycle, a person and a table/chair combination were detected and graphically depicted in a horizontal angle range of > 140 degrees at a distance of 25 meters. As part of Research Fab Microelectronics Germany (FMD), the proof-of-concept project for this high-resolution wide-angle LiDAR system had started the year before. The system also contains an FBH laser module including control electronics and is equipped with custom-designed transmitter optics. Centerpiece of this module is a pulsed wavelength-stabilized diode laser, which provides more than 30 watts of peak optical power at 905 nm wavelength. This was the first time an FBH laser module was successfully

used for real-world LiDAR measurements. Additional components came from FMD partner institutes: Fraunhofer IMS provided a SPAD array with pre-processing electronics and Fraunhofer ISIT supplied the MEMS scanner, which is exclusively commercialized and further developed by OQmented.

The MEMS startup is working on further optimizations for future use in the automotive sector. For example, a better signal-to-noise ratio is to provide more detection range, and the scan angle for the horizontal field of view is to be extended to 180 degrees. Another goal is to reduce the size of the components used in a way that meets both performance and system integration requirements. Together with its partners, OQmented aims to bring a compact LiDAR system in a minimal configuration to the market at an attractive price.

LiDAR-Lasermodul im Einsatz – 3D-Objekterkennung im Nahbereich



📌 OQmented test setup, in which various objects were detected in a wide angular range.
Testanordnung von OQmented, in dem verschiedene Objekte in einem weiten Winkelbereich erfasst wurden.



Für das autonome und teilautonome Fahren sind zuverlässige Sicherheitssysteme unerlässlich. Gängige Kamera- und Radarsysteme sind jedoch bei schwierigen Lichtverhältnissen oder komplexen Verkehrssituationen oft überfordert.

Das Startup OQmented hat 2020 für das nahe Umfeld ein LiDAR-Gesamtsystem für die 3D-Objekterkennung realisiert und erfolgreich demonstriert. Das System funktioniert auch bei gleißendem Sonnenlicht und punktet mit reduzierter Systemkomplexität. In einem Testaufbau wurden Objekte wie etwa ein Fahrrad, eine Person und eine Tisch-/Stuhl-Kombination in einem horizontalen Winkelbereich von > 140 Grad in 25 Metern Entfernung erkannt und grafisch dargestellt.

Das Proof-of-Concept-Projekt für das hochauflösende Weitwinkel-LiDAR-System war im Jahr zuvor im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) gestartet. Integriert wurde auch ein Lasermodul aus dem FBH inklusive Steuerelektronik und mit einer speziell entwickelten Sendeoptik – mit einem gepulsten wellenlängenstabilisierten Diodenlaser als Herzstück, der bei 905 nm Wellenlänge mehr als 30 Watt optische Spitzenleistung bereitstellt. Damit wurde erstmals ein FBH-Lasermodul für praktische LiDAR-Messungen erfolgreich eingesetzt. Von FMD-Partnerinstituten kamen weitere Komponenten: Das Fraunhofer IMS lieferte ein SPAD-Array mit einer Vorverarbeitungs-Elektronik und das Fraunhofer ISIT den MEMS-Scanner, der ex-

klusiv von OQmented kommerzialisiert und weiterentwickelt wird.

Für den künftigen Einsatz im Automobil-Bereich arbeitet das MEMS-Startup an weiteren Optimierungen. So soll ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis für mehr Reichweite sorgen und der Scanwinkel für den horizontalen Sichtbereich auf 180 Grad erweitert werden. Angestrebt ist auch, die Größe der verwendeten Komponenten so zu reduzieren, dass sie die Anforderungen an Leistung und Systemintegration gleichermaßen erfüllen. OQmented will dadurch zusammen mit seinen Partnern am Markt ein kompaktes LiDAR-System in Minimal Konfiguration zu einem attraktiven Preis anbieten.

📌 Pulse laser source from FBH with control electronics developed for OQmented's LiDAR system. Puls laserquelle aus dem FBH mit Kontrollelektronik, die für das LiDAR-System von OQmented entwickelt wurde.

High-speed laser driver with high efficiency for LIDAR applications

To increase driving safety and prepare for fully autonomous driving, LiDAR (Light Detection and Ranging) systems are increasingly used in vehicles. Such applications require a high and variable repetition rate of the laser pulses, since not only a simple pulse per scan is to be transmitted and detected but a sequence of pulses. This feature allows to realize pulse coding and thus to uniquely identify the signals related to the own system, which is important in multi-user scenarios as encountered in autonomous driving. However, with higher repetition rates the constraints on dissipated power become more severe. As a consequence, the efficiency of the high-speed driver circuits implemented so far, which is in the single-digit percentage range, must be improved to well over 10%. This is beneficial also for other applications where dissipated power is critical.

» This is three to four times more than comparable LiDAR laser driver systems used so far can deliver.

To accomplish this combination of speed and efficiency, the FBH has developed a new driver concept using two different driver stages. A fast, but less efficient driver stage (boost driver)

with high voltage excites a short pulse of defined width to realize a steep slope of the initial pulse edge. Simultaneously, a slower stage (main driver) with low operating voltage and thus high efficiency starts a longer pulse with the desired pulse width. Pulse width and falling edge of the fast stage as well as the rising edge of the slow stage can be adjusted in a way that, in total, an almost rectangular optical output pulse is generated. Since the fast driver stage is only active for a short time while the slow stage covers the main part, the energy efficiency of the overall arrangement increases compared to the single-stage case. The larger the ratio of the total pulse width to that of the initial one of the fast driver, the higher the gain in efficiency. For better heat dissipation, the driver stages are mounted on a thermally well conductive copper core board. The presented system reaches efficiencies of 12 – 15%, depending on the repetition frequency, for 10 ns long pulses. This is three to four times more than comparable LiDAR laser driver systems used so far can deliver. At the maximum repetition rate of 18 MHz an average optical power of about 1.5 W is achieved.

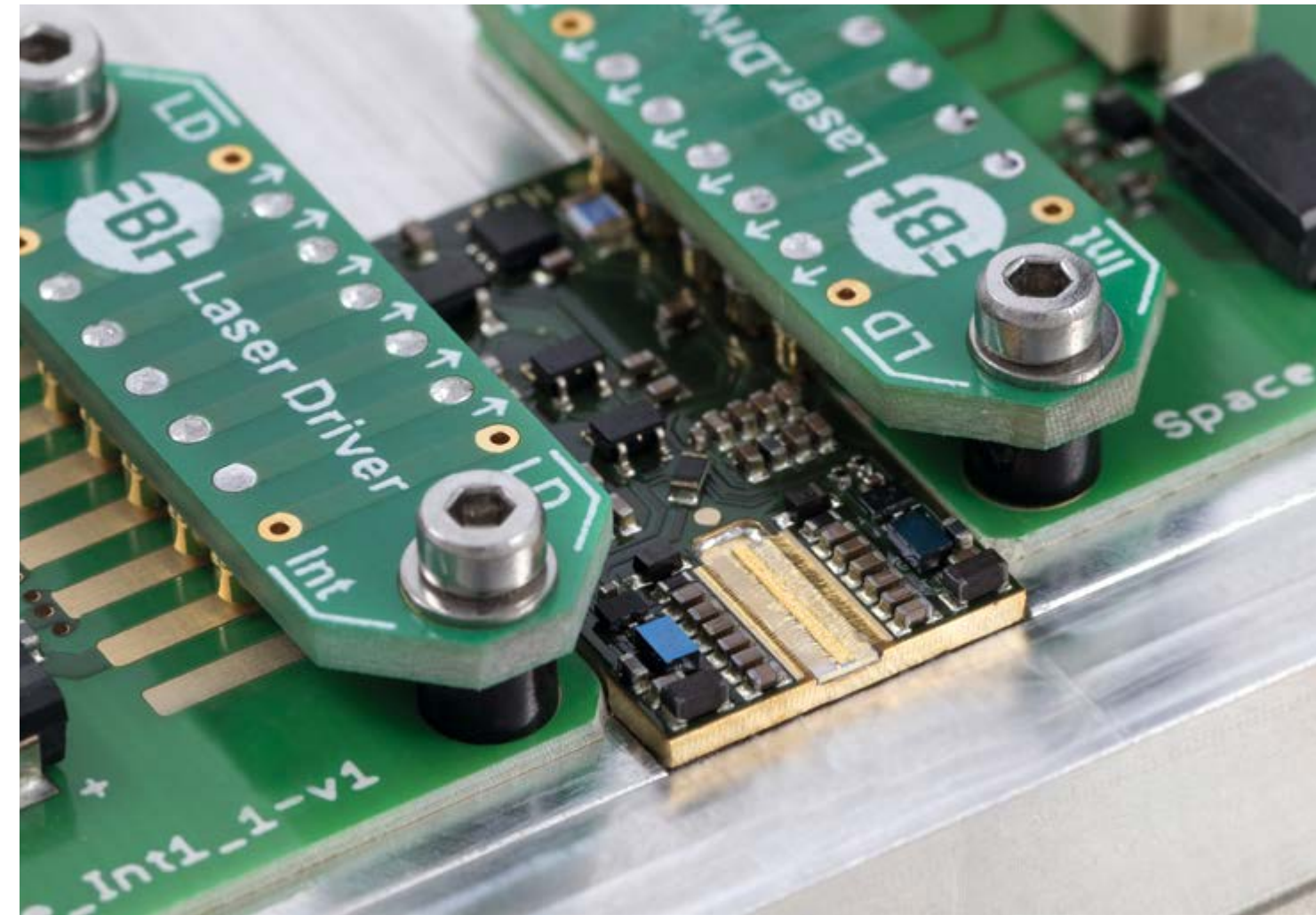
The combination of the two drivers results in a laser system with both very short rising edges and high efficiency, allowing the total pulse width to be selected over a wide range. This makes the system interesting not only for pulse-coded LiDAR systems, but also for optical frequency multipliers, for instance.

Hochgeschwindigkeits-Lasertreiber mit hohem Wirkungsgrad für LIDAR-Anwendungen

Immer öfter werden in Fahrzeugen auch LiDAR-Systeme (Light Detection and Ranging) eingesetzt, um die Fahrsicherheit zu erhöhen und das vollständig autonome Fahren vorzubereiten. Diese Anwendungen benötigen Laserpulse mit einer hohen und variablen Wiederholrate, da nicht nur ein einfacher Puls pro Scan gesendet und detektiert werden soll, sondern eine Impulsfolge. Dadurch ist es möglich, die Pulse zu kodieren, um die Signale des eigenen Systems eindeutig zu identifizieren. Gerade in Multi-User-Szenarien, zu denen auch das autonome Fahren zählt, ist das wichtig. Die höheren Wiederholraten führen jedoch zu Beschränkungen durch die Ver-

lustleistung. Daher muss der Wirkungsgrad der bisherigen Hochgeschwindigkeits-Treiberschaltungen vom einstelligen Prozentbereich auf deutlich über 10% verbessert werden. Dies ist auch für alle anderen Anwendungen interessant, bei denen die Verlustleistung eine entscheidende Rolle spielt.

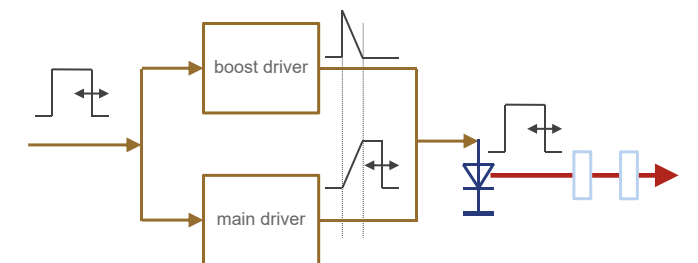
Um Geschwindigkeit mit Effizienz zu kombinieren, hat das FBH ein neues Treiberkonzept mit zwei unterschiedlichen Treiberstufen entwickelt. Eine schnelle, aber weniger effiziente Treiberstufe (Boost-Treiber) mit hoher Spannung regt einen kurzen Impuls definierter Breite an, um eine steile Anfangs-



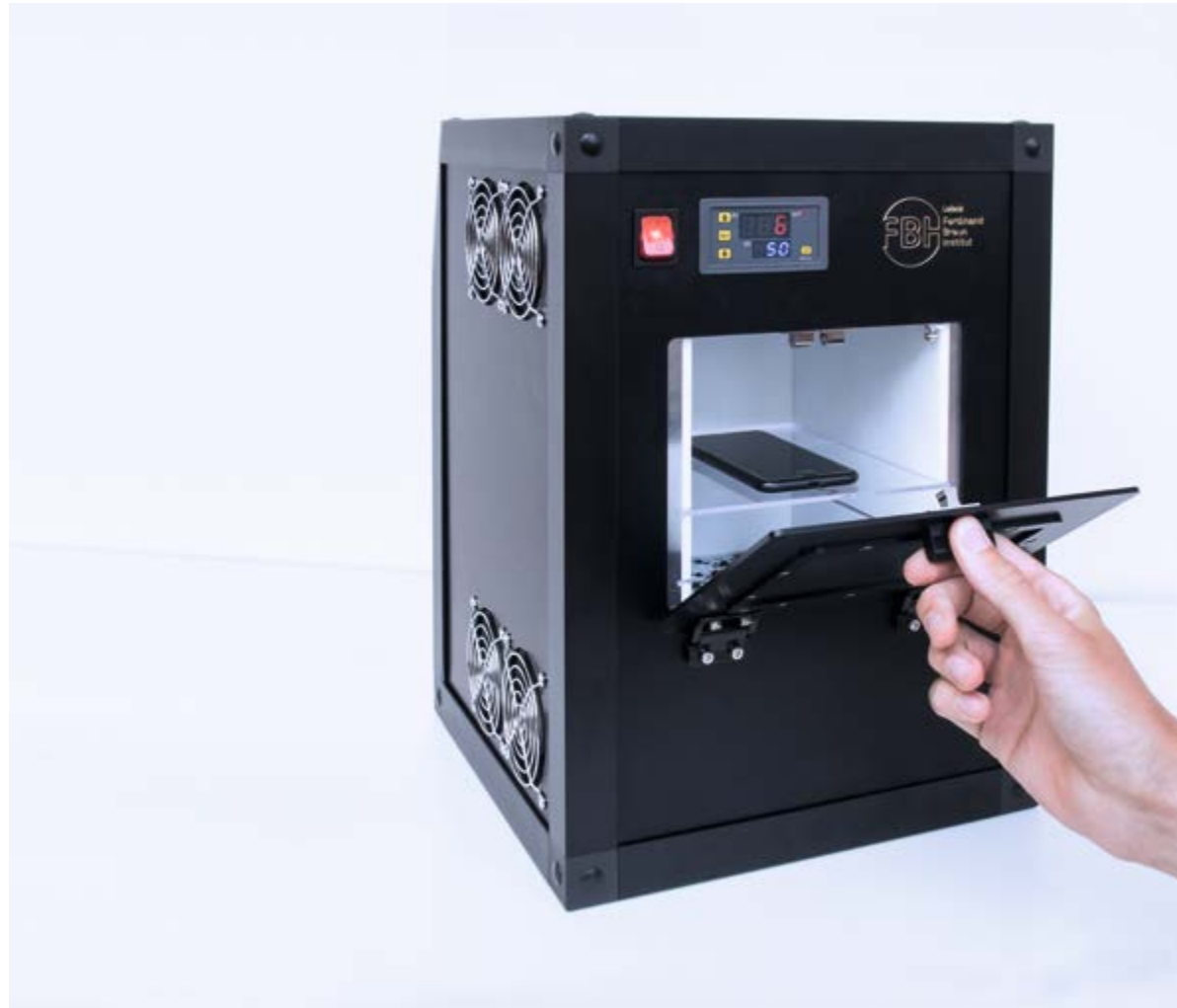
LiDAR laser module to be used in space. The test module employs the novel driver concept in which two drivers ensure high speed and efficiency at the same time. LiDAR-Lasermodule, das im Weltraum eingesetzt werden soll. Das Testmodul nutzt das neuartige Treiberkonzept, bei dem zwei Treiber für zugleich hohe Geschwindigkeit und Effizienz sorgen.

impulsflanke zu erzeugen. Gleichzeitig startet eine langsamere Stufe (Haupttreiber) mit niedriger Betriebsspannung – und damit hohem Wirkungsgrad – einen längeren Impuls mit der gewünschten Impulsbreite. Pulsbreite und fallende Flanke der schnellen Stufe sowie steigende Flanke der langsamen Stufe können so aufeinander abgestimmt werden, dass insgesamt ein nahezu rechteckiger optischer Ausgangspuls erzeugt wird. Da die schnelle, ineffiziente Treiberstufe nur kurzzeitig aktiv ist, während die langsame und energieoptimierte Stufe den Hauptteil abdeckt, steigt die Energieeffizienz der Gesamtanordnung. Je größer das Verhältnis der Gesamtpulsbreite zu der des Anfangspulses des schnellen Treibers ist, desto höher ist der Effizienzgewinn. Zur besseren Entwärmung sind die Treiberstufen auf eine thermisch gut leitende Kupferkernplatte montiert. Das vorgestellte System erreicht je nach Wiederholrate Wirkungsgrade von 12 – 15% bei 10 ns langen Pulsen. Das ist drei- bis viermal mehr als vergleichbare, bisher eingesetzte Lasertreibersysteme für LiDAR-Anwendungen liefern. Mit einer maximalen Repetitionsrate von 18 MHz erreicht das System eine mittlere optische Leistung von etwa 1,5 W.

Durch die Kombination der beiden Treiber entsteht ein Lasersystem mit zugleich sehr kurzen Anstiegsflanken und hoher Effizienz. Dadurch lässt sich die Gesamtpulsbreite in einem weiten Bereich auswählen. Das macht das System nicht nur für pulskodierte LiDAR-Systeme interessant, sondern auch für Applikationen wie etwa optische Frequenzvervielfacher.



Block diagram of the laser driver with two different driver stages. Blockdiagramm des Lasertreibers mit zwei verschiedenen Treiberstufen.



Fighting pathogens and disinfecting surfaces – UVC LED-based irradiation systems

At the Ferdinand-Braun-Institut, the in-house Prototype Engineering Lab has been successfully developing and implementing irradiation systems with UV light-emitting diodes (LEDs) for several years. The LED systems can be used flexibly, from plant illumination to medical applications, and additionally offer many advantages over other UV radiation sources, especially mercury vapor lamps. LEDs are small and can therefore be used in places that are difficult to access. Their wavelength can be adjusted to provide the optimum efficacy for the particular application. And last but not least, UV LEDs do not contain any toxic substances. The technology basis for UV LEDs has been created within the consortium 'Advanced UV for Life' and jointly developed by TU Berlin and FBH.

Together with its spin-off UVphotonics, FBH has developed various flexible irradiation modules that can be equipped with multiple LEDs – if required also with LEDs of different emission wavelengths to generate a defined spectrum. These modules

⚙️ This UVC-LED demonstrator system with 265 nm LEDs was designed specifically to disinfect everyday objects. Dieser UVC-LED-Demonstrator mit 265 nm LEDs wurde speziell entwickelt, um Alltagsgegenstände zu desinfizieren.

can be used to construct systems to irradiate larger areas, and their geometry can be tailored precisely to the application. For disinfection purposes, for example, modules were equipped with in-house developed LEDs that emit at a wavelength of 265 nm. This allows to eliminate pathogens on surfaces such as mobile phones. In the ready-to-use system, the object lies on a UV-transparent pane and can thus be irradiated from both sides. In less than ten minutes, the system reaches a UV dose of 500 mJ/cm², as recommended, for example, by the Centers for Disease Control and Prevention (US Department of Health & Human Services).

UVC light to fight multidrug-resistant pathogens and coronaviruses

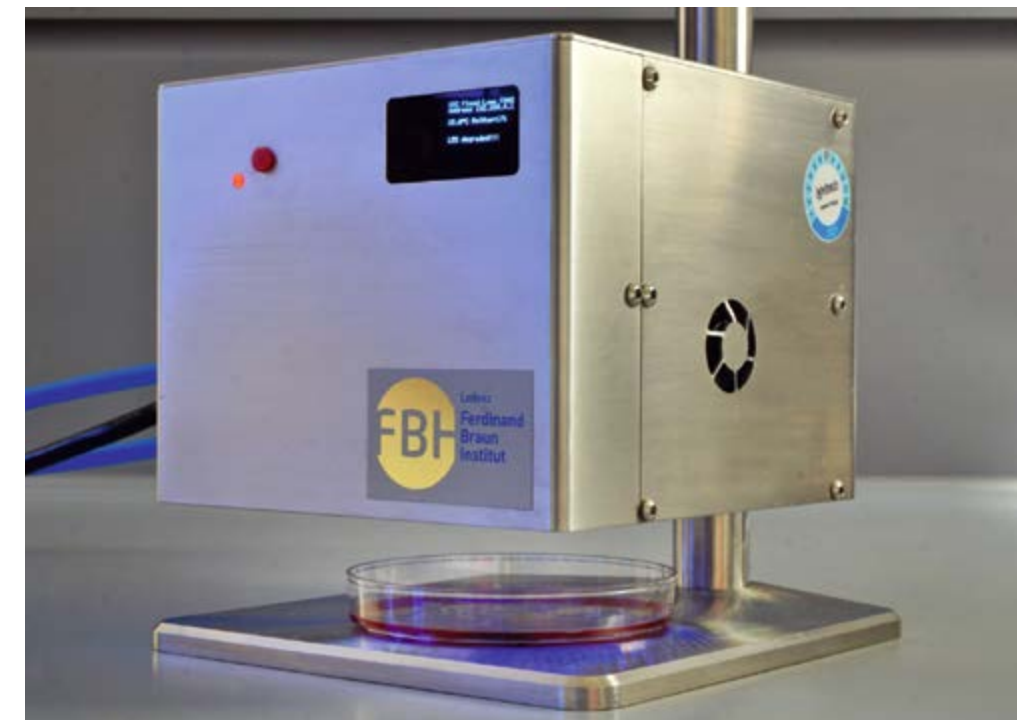
Irradiation systems equipped with 233 nm LEDs developed by FBH and TU Berlin are already undergoing practical testing at Charité and Greifswald University Hospital – initial results are promising. In the future, the short-wavelength UVC LEDs are to be used to eliminate multidrug-resistant (MDR) pathogens directly on humans or in their immediate vicinity – light of this wavelength penetrates the skin by only a few micrometers. The Charité is investigating the intensity and duration of irradiation at which DNA damage to the skin can occur. In parallel, the Greifswald University Hospital is determining how effectively the UV LED emitters eliminate MDR pathogens. The aim is to develop an irradiation recipe that reliably inactivates them and at the same time does not harm the skin with lasting effect. Further details can be found on p. 74.

The CORSA project, which started in January 2021, is based on this experience. It aims to render SARS-CoV-2 and other respiratory viruses on surfaces and skin harmless by means of UVC light. The nine project partners from research and industry are developing special UVC LEDs and suitable irradiation systems for this purpose. In addition, they are investigating parameters such as the influence of wavelength, irradiation dose and habitat of the viruses. They are also testing how to eliminate coronavirus in ventilation systems when the circulated air or the filters are irradiated. UVC LEDs in the wavelength range around 270 nm are being used for this purpose. LEDs with emissions around 233 nm are to be used directly on humans. The BMBF is supporting the three-year project with a total of three million euros.

Krankheitserreger bekämpfen und Oberflächen desinfizieren – Bestrahlungssysteme mit UVC-LEDs

Am Ferdinand-Braun-Institut entwickelt und realisiert das hauseigene Entwicklungszentrum seit mehreren Jahren erfolgreich Bestrahlungssysteme mit UV-Leuchtdioden (LED). Sie sind flexibel einsetzbar, von der Pflanzenbeleuchtung bis hin zu medizinischen Anwendungen. Zudem bieten sie viele Vorteile gegenüber anderen UV-Strahlungsquellen wie insbesondere Quecksilberdampflampen. LEDs sind klein und lassen sich daher auch an schwer zugänglichen Stellen nutzen. Ihre Wellenlänge kann so eingestellt werden, dass sie die für die jeweilige Anwendung optimale Wirksamkeit bieten. Und nicht zuletzt enthalten UV-LEDs keine giftigen Substanzen. Die Technologiebasis für die UV-LEDs wurde im Rahmen des Konsortiums „Advanced UV for Life“ geschaffen und von der TU Berlin und dem FBH gemeinsam entwickelt.

Zusammen mit seiner Ausgründung UVphotonics hat das FBH verschiedene flexibel einsetzbare Bestrahlungsmodule entwickelt. Diese können mit mehreren LEDs bestückt werden – bei Bedarf auch mit LEDs unterschiedlicher Emissionswellenlänge, um ein definiertes Spektrum zu erzeugen. Mit diesen Modulen lassen sich größere Flächenstrahler aufbauen, deren Geometrie exakt auf die Anwendung zugeschnitten



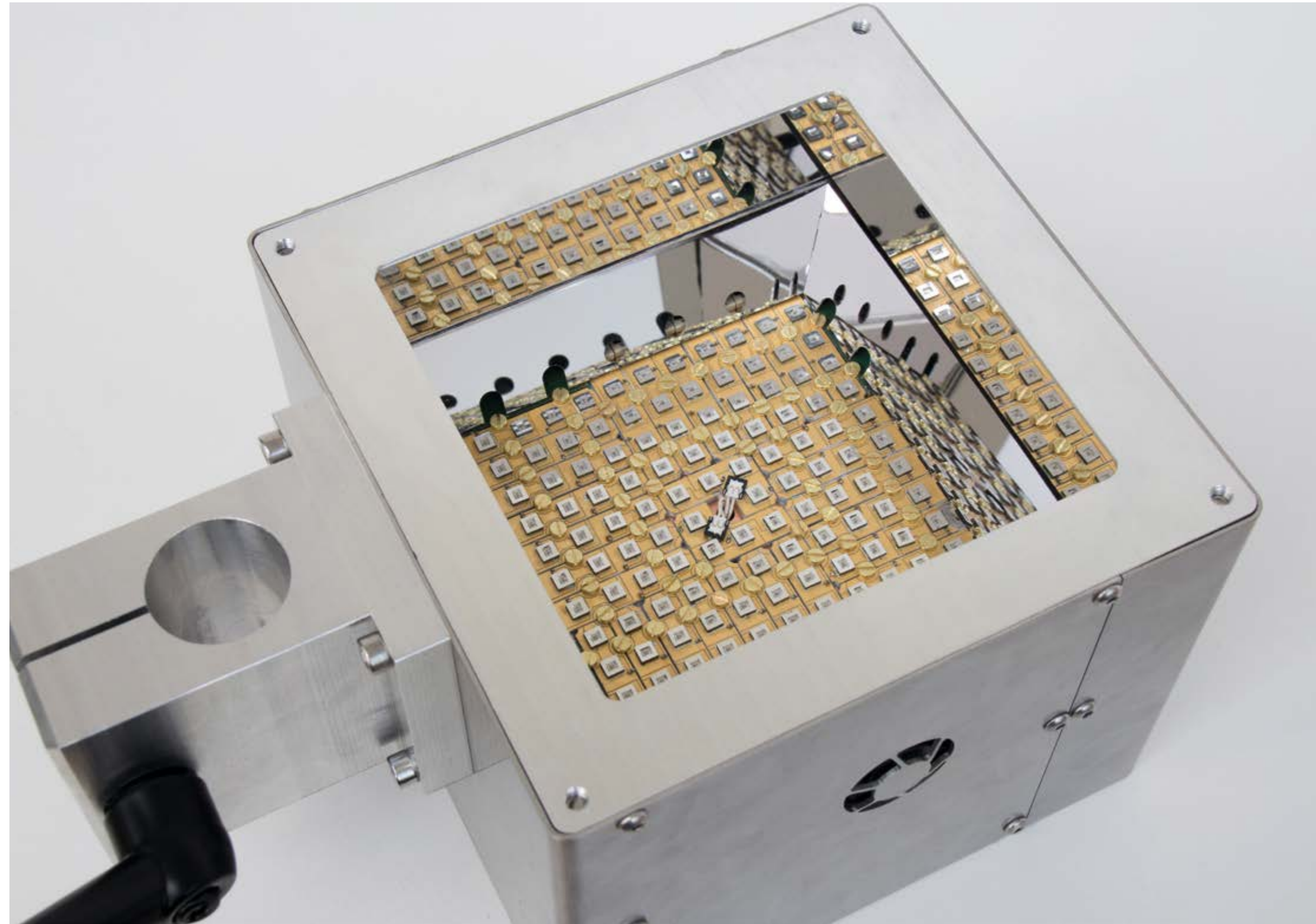
⚙️ UVC LED irradiation system used at Greifswald University Hospital to determine which dose and irradiation time effectively eliminates pathogens. UVC-LED-Bestrahlungssystem, das am Universitätsklinikum Greifswald eingesetzt wird, um zu bestimmen, bei welcher Dosis und Bestrahlungszeit Krankheitserreger effektiv eliminiert werden.

werden kann. Zu Desinfektionszwecken beispielsweise wurden Module mit selbst entwickelten LEDs, die bei einer Wellenlänge von 265 nm emittieren, ausgestattet. Damit können Erreger auf Oberflächen, wie etwa Mobiltelefonen, beseitigt werden. In dem fertigen System liegt der Gegenstand auf einer UV-transparenten Scheibe und kann so beidseitig bestrahlt werden. In weniger als zehn Minuten erreicht das System eine UV-Dosis von 500 mJ/cm², wie sie beispielsweise von den Centers for Disease Control and Prevention (US Department of Health & Human Services) empfohlen wird.

UVC-Licht gegen multiresistente Erreger und Coronaviren

An der Charité und der Universitätsmedizin Greifswald werden Bestrahlungssysteme mit 233 nm LEDs aus dem FBH und der TU Berlin bereits praktisch getestet. Erste Ergebnisse sind vielversprechend. Mit den kurzwelligen UVC-LEDs sollen multiresistente Erreger (MRE) künftig direkt am Menschen beseitigt werden – Licht dieser Wellenlänge dringt nämlich nur wenige Mikrometer in die Haut ein. Die Charité untersucht hierbei, ab welcher Bestrahlungsintensität und -dauer DNA-Schäden an Haut auftreten können. Parallel ermittelt die Universitätsmedizin Greifswald, wie effektiv der UV-LED-Strahler MRE abtötet. So soll ein Bestrahlungsrezept entwickelt werden, das die Erreger zuverlässig inaktiviert und zugleich die Haut nicht nachhaltig schädigt. Weitere Details dazu gibt es auf S. 74.

Auf diesen Erfahrungen baut das im Januar 2021 gestartete Projekt CORSA auf, in dem SARS-CoV-2 und weitere Atemwegsviren auf Oberflächen und Haut mittels UVC-Licht unschädlich gemacht werden sollen. Die neun Projektpartner aus Forschung und Industrie entwickeln dafür spezielle UVC-LEDs und geeignete Bestrahlungssysteme. Zudem untersuchen sie Parameter wie den Einfluss der Wellenlänge, der Bestrahlungsdosis oder des Lebensraums der Viren. Sie testen auch, wie sich das Coronavirus in Lüftungsanlagen beseitigen lässt, wenn die umgewälzte Luft oder die Filter bestrahlt werden. Dafür werden UVC-LEDs im Wellenlängenbereich um 270 nm verwendet. LEDs mit Emissionen um 233 nm sollen direkt am Menschen eingesetzt werden. Das BMBF unterstützt das dreijährige Vorhaben mit insgesamt drei Millionen Euro.



Unit with 120 UVC LEDs integrated into an irradiation system used to inactivate multidrug-resistant pathogens.
Modul mit 120 UVC-LEDs, die in ein Bestrahlungssystem integriert werden, um multiresistente Erreger unschädlich zu machen.

» Mit den kurzwelligen UVC-LEDs sollen multiresistente Erreger (MRE) künftig direkt am Menschen beseitigt werden – Licht dieser Wellenlänge dringt nämlich nur wenige Mikrometer in die Haut ein.



➤ Dual-wavelength diode laser system used in the laboratory for Raman measurements. Zweiwellenlängen-Diodenlasersystem, das im Labor für Raman-Messungen eingesetzt wird.

Out of the lab and into the field – portable Raman measurement systems

For many years, the Ferdinand-Braun-Institut has been developing customized diode lasers and application-specific sensor systems for Raman spectroscopy, especially for Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS). At the heart of these spectroscopic systems are dual-wavelength diode lasers that emit two slightly shifted laser wavelengths from a single chip. This allows the Raman signals to be efficiently separated from interfering background influences, such as fluorescence and daylight. The systems have already proven their capability in practical tests – during on-site measurements in an apple orchard and in the field.

The work within the Innovation Campus Electronics and Micro-sensors Cottbus (iCampus) goes one step further. Here, FBH together with Fraunhofer IPMS is developing a spectrometer-

less resonance Raman system based on a measuring principle patented by FBH. The system is specifically designed to detect carotenoids, which are of interest in healthcare and life sciences. The overall system has been further miniaturized with this concept and does not require complex and expensive spectrometers – it can thus be realized at significantly lower cost.

Successfully demonstrated in the field: SERDS sensor system for soil analysis

Healthy soils are just as important for agricultural yield as they are for environmental protection. The more is known about their composition, the better they can be supplied with nutrients – and in fact where these are actually needed. This protects soils and groundwater from overfertilization, and crops yield good harvests. Sensors can be used to determine soil nutrients



➤ FBH's portable SERDS sensor system in a real-world test. The system successfully performed Raman measurements in a field. Tragbares SERDS-Sensorsystem des FBH im Feldeinsatz. Damit wurden erfolgreich erste Raman-Messungen auf einem Acker durchgeführt.

such as phosphorus and nitrogen as well as chemical compounds on a site-specific basis.

FBH has developed a portable, field-compatible SERDS sensor system for measurements on soils. With it, the first successful measurements were carried out in December 2020 in a field of the Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB) in Potsdam-Marquardt. The excitation source is an FBH diode laser that provides two wavelengths around 785 nm. This laser is implemented into a turnkey system, also developed by FBH, which provides the necessary electronics and temperature control. This system is designed so that the laser light can be easily coupled into an optical fiber to the Raman probe. The backscattered Raman signals are coupled into a compact spectrometer for wavelength selective detection. All

components, including the battery, were integrated into a rugged, field-ready case. The sensor system has a proprietary measurement and evaluation software. Results obtained from these SERDS measurements are currently being evaluated.

Aus dem Labor in die praktische Anwendung – portable Raman-Messsysteme

Das Ferdinand-Braun-Institut entwickelt seit vielen Jahren maßgeschneiderte Diodenlaser und anwendungsspezifische Sensorsysteme für die Raman-Spektroskopie, speziell für die Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS). Herzstücke dieser spektroskopischen Systeme sind Zweiwellenlängen-Diodenlaser, die zwei leicht verschobene Laserwellenlängen aus einem Chip emittieren. Dadurch lassen sich die Raman-Signale effizient von störenden Hintergrundinflüssen, wie Fluoreszenz oder Tageslicht, trennen. Ihre Leistungsfähigkeit haben die Systeme in praktischen Tests bereits unter Beweis gestellt – bei Vor-Ort-Messungen in einer Apfelplantage und auf dem Feld.

Noch einen Schritt weiter gehen die Arbeiten im Rahmen des Innovationscampus Elektronik- und Mikrosensorik Cottbus (iCampus). Hier entwickelt das FBH gemeinsam mit dem Fraunhofer IPMS ein spektrometerloses Resonanz-Raman-System, das auf einem patentierten Messprinzip des FBH ba-

siert. Damit sollen speziell Carotinoide nachgewiesen werden, die für Medizin und Lebenswissenschaften interessant sind. Das mit diesem Konzept weiter miniaturisierte Gesamtsystem kommt ohne komplexe und aufwändige Spektrometer aus – und kann dadurch deutlich kostengünstiger realisiert werden.

Erfolgreich im Feld demonstriert: SERDS-Sensorsystem für die Bodenanalyse

Gesunde Böden sind für landwirtschaftliche Erträge ebenso wichtig wie für den Schutz der Umwelt. Je mehr über ihre Zusammensetzung bekannt ist, desto besser lassen sie sich mit Nährstoffen versorgen – und zwar dort wo diese tatsächlich benötigt werden. Das schützt Böden und Grundwasser vor Überdüngung und die Pflanzen liefern gute Erträge. Mit Sensoren lassen sich Bodennährstoffe wie Phosphor und Stickstoff ebenso wie chemische Verbindungen ortsspezifisch bestimmen.

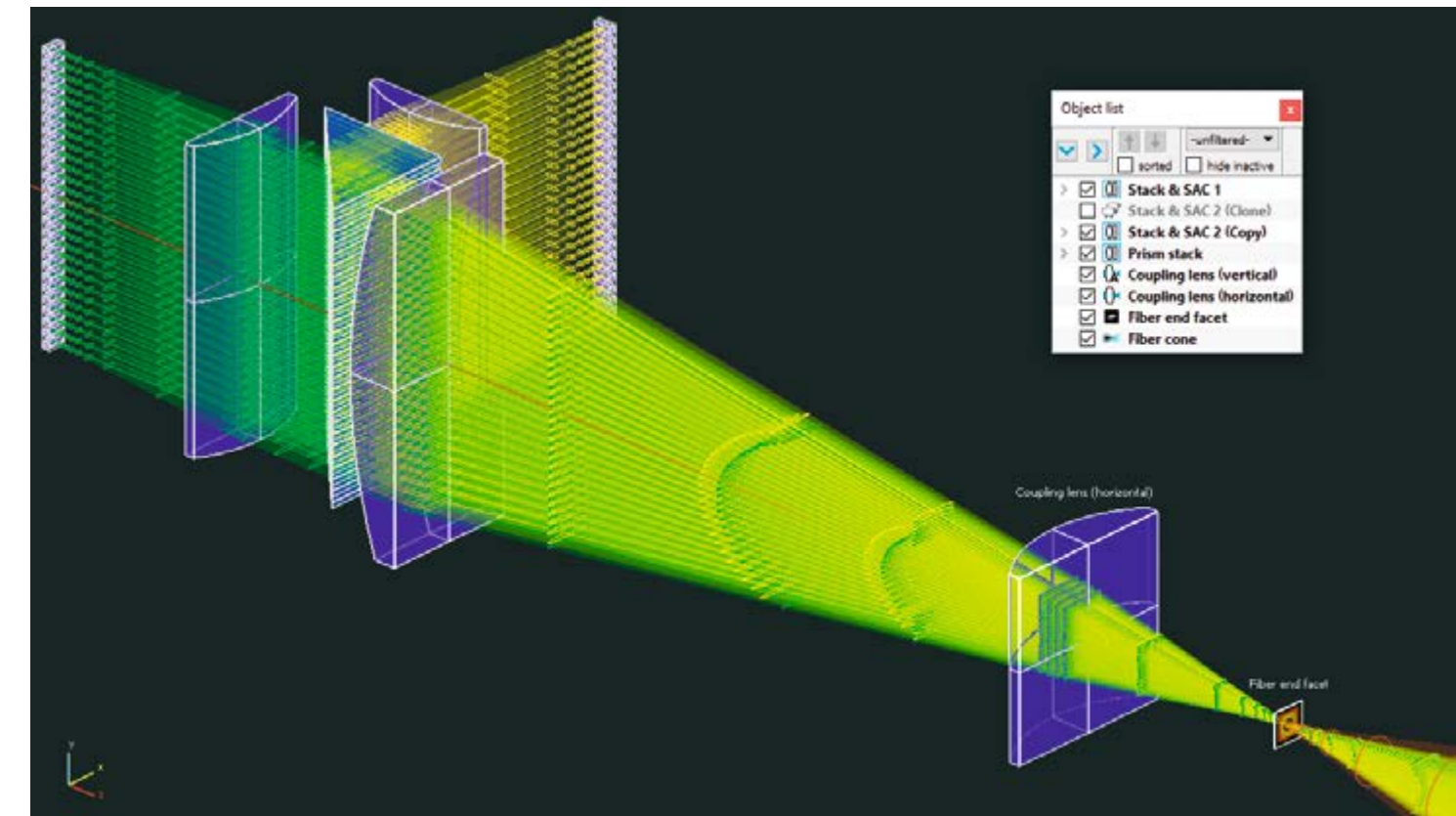
Das FBH hat ein tragbares, feldtaugliches SERDS-Sensorsystem für Messungen an Böden entwickelt. Damit wurden im Dezember 2020 erste erfolgreiche Messungen auf einem Acker des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) in Potsdam-Marquardt durchgeführt. Anregungsquelle ist ein Diodenlaser aus dem FBH mit zwei Wellenlängen bei 785 nm. Der Laser ist in ein ebenfalls am FBH entwickeltes Turnkey-System implementiert, das die notwendige Elektronik und die Temperierung bereitstellt. Dieses System ist so aufgebaut, dass das Laserlicht einfach in eine optische Faser zur Raman-Sonde eingekoppelt werden kann. Die rückgestreuten Raman-Signale werden in ein kompaktes Spektrometer zur wellenlängenselektiven Detektion eingekoppelt. Sämtliche Komponenten inklusive Batterie wurden in ein robustes, feldtaugliches Gehäuse integriert. Das Sensorsystem verfügt über eine selbstentwickelte Mess- und Auswerte-Software. Die aus diesen SERDS-Messungen gewonnenen Ergebnisse werden derzeit ausgewertet.



Customized Raman probe used for laboratory investigations (above) and for in situ SERDS soil analysis in the field (below). Maßgeschneiderte Raman-Optode, die für Laboruntersuchungen (oben) und für die in-situ Bodenanalyse mittels SERDS im Feld (unten) eingesetzt wurde.

Founding champion – how the FBH spin-offs develop

Since its beginning, the Ferdinand-Braun-Institut has created a total of eleven spin-offs, most of which are still active today. Three of these spin-offs are presented here as examples!



Simulation of a fiber-coupled high-power pump module with 56 diode lasers using BeamXpertDESIGNER. Simulation eines fasergekoppelten Hochleistungs-Pumpmoduls mit 56 Diodenlasern mit BeamXpertDESIGNER.

BeamXpert – excellent simulation

The most recent spin-off BeamXpert was founded in December 2017. The company's BeamXpertDESIGNER software allows optical laser beam guidance systems to be designed quickly and accurately – and thus tailored precisely to the respective operational area. Applications range from high-power lasers in the kilowatt range to laser developments for ophthalmology and optics for satellite communications. BeamXpertDESIGNER offers an intuitive user interface and combines two complementary modeling approaches that allow users to visualize and analyze 3D beam paths in real time. For this purpose, nearly 18,000 optical components from different manufacturers can be easily added to the layout from the component database via drag and drop to optimally configure the system. BeamXpert received several awards for this business idea during the start-up phase.

Since then, the company has developed well and licenses its software to customers in industry and research worldwide. TRUMPF Lasersystems for Semiconductor Manufacturing GmbH is among the satisfied customer base. The company uses the straightforward software to design the optical layout of highly complex laser beam sources that generate extreme ultraviolet (EUV) radiation for wafer exposure. Not only can such layouts be visualized particularly quickly with BeamXpertDESIGNER, the software also considers the apertures of all assemblies used. For the development of EUV lithography, Trumpf and other partners were awarded the Future Prize of the German Federal President in November 2020.

BeamXpert is continuously advancing its software. Most recently, the company implemented an export function that allows

Starting in 2024, the MERLIN climate satellite will measure the concentration of the greenhouse gas methane in the atmosphere. Ab 2024 soll der Klimasatellit MERLIN die Konzentration des Treibhausgases Methan in der Atmosphäre messen.

component data and positions to be exported directly to commercial mechanical design CAD programs. It also implemented an optimization tool that takes multiple target variables into account, thus further accelerating the workflow from design to product at the customer's site.

eagleyard Photonics – internationally successful with high-power laser diodes

eagleyard Photonics was founded in 2002 and is thus the 'old stager' among the FBH spin-offs. The company is one of the leading international suppliers of high-power laser diodes with wavelengths ranging from 650 nm to 1120 nm. The foundation for this was created by the research achievements of the Ferdinand-Braun-Institut. Meanwhile, about 40 employees are part of the team and supply customers worldwide. After several successful financing rounds, the company has become part of the TOPTICA Photonics Group in 2013 generating group sales of more than 70 million euros. Since 2020, the FBH spin-off has been marketing its laser diodes under the brand name Toptica eagleyard.

Whether narrow-band or multi-mode, broad-area lasers or laser bars, eagleyard manufactures laser diodes for a wide range of demands and applications on an industrial scale. The products combine maximum power, utmost lifetime and excellent beam quality. This makes them particularly suitable for medical, industrial, space and scientific applications, such as metrology, oxygen measurement, and quantum technology.

The achievements are impressive. For example, eagleyard has supplied its reliable and robust DFB laser diodes for several ambitious space and satellite applications. These include the GAIA mission launched by the European Space Agency ESA in 2013, which resulted in a three-dimensional map of the Milky Way. To date, the positions, distances and movements of around



one billion stars have been measured with unprecedented precision. eagleyard's DFB laser diodes are also used on the MERLIN satellite, which is due to be launched into space in 2024 to measure the concentration of the greenhouse gas methane in the atmosphere. Such applications are particularly demanding in terms of stability and robustness of the laser diodes. The GAIA mission, for example, is designed for 15 years – and naturally the laser diodes must also function reliably over this period.

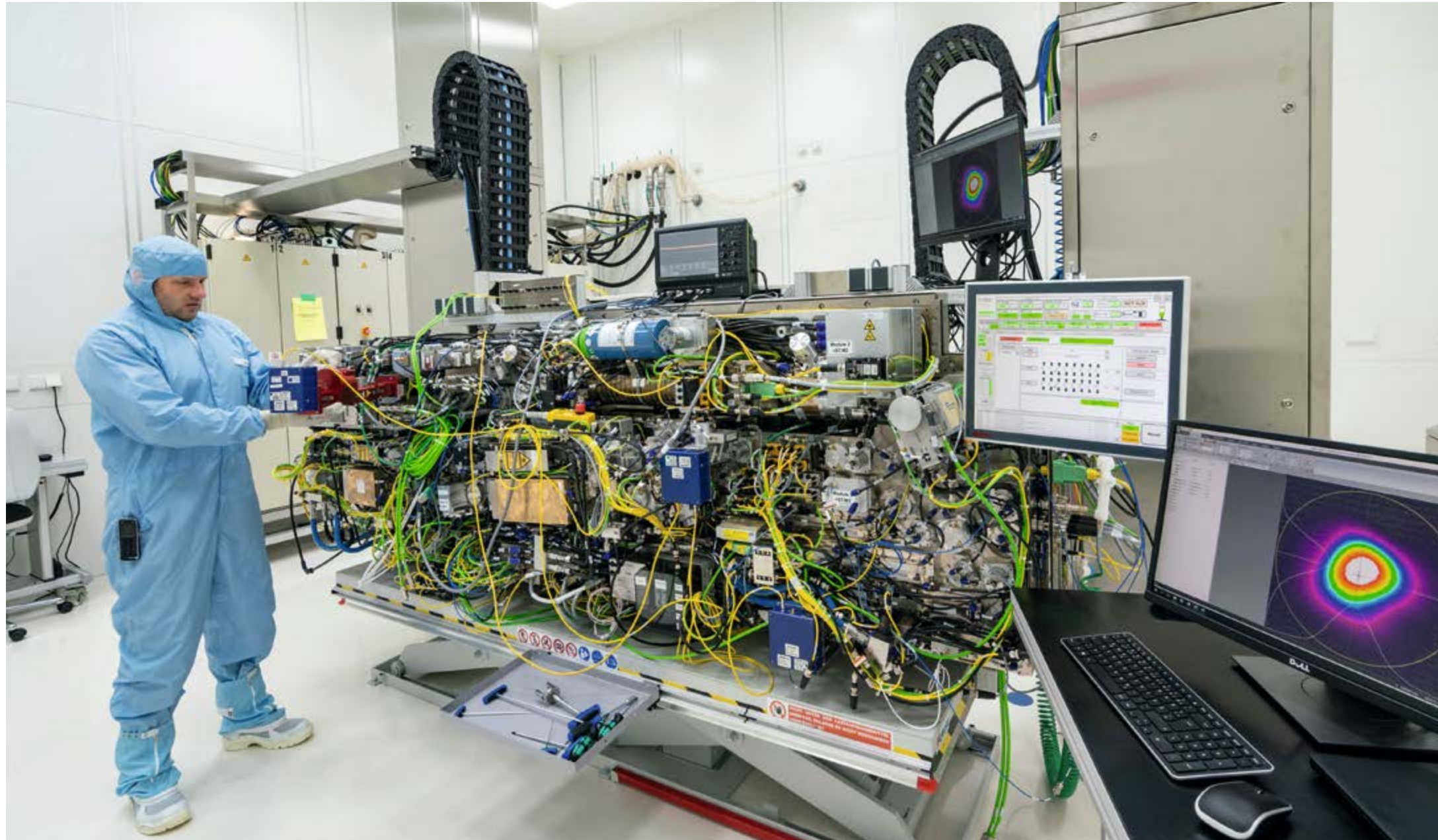
Another field of application is mobile, high-resolution 3D scanners, which are used to document traffic accidents or crime scenes. The excellent efficiency, the integrated beam shaping and at the same time very compact design of the laser diodes enable battery-powered operation, which is essential for handheld devices.



808 nm Fabry-Perot laser with hermetic butterfly package for metrology applications. 808 nm Fabry-Perot-Laser mit hermetischem Butterfly-Gehäuse für messtechnische Anwendungen.



Newly developed 785 nm DFB laser diode in small TO-5 package with high performance and excellent signal-to-noise ratio. Neu entwickelte 785 nm DFB-Laserdiode im kleinen TO-5-Gehäuse mit hoher Leistung und hervorragendem Signal-Rausch-Verhältnis.



- Assembly and commissioning of a component for the TRUMPF EUV laser system in a cleanroom – the system design was simulated with BeamXpertDESIGNER.
Montage und Inbetriebnahme einer Komponente für das TRUMPF EUV-Lasersystem im Reinraum – das Systemdesign wurde mit BeamXpertDESIGNER simuliert.

Gründungsmeister – so entwickeln sich die FBH Spin-offs

Das Ferdinand-Braun-Institut hat seit seiner Gründung insgesamt elf Ausgründungen hervorgebracht, von denen die meisten auch heute noch aktiv sind. Drei dieser Spin-offs stellen wir an dieser Stelle exemplarisch vor!

UVphotonics – using ultraviolet light

At UVphotonics NT GmbH, everything revolves around light-emitting diodes (LEDs) – with a focus on LEDs in the UVB and UVC spectral range. These light sources have a wide range of applications, from water treatment, disinfection and medical diagnostics to UV curing and sensor technology. The company started with 310 nm LEDs in 2015. Since then, it has gradually expanded its wavelength portfolio to include 300 – 330 nm, 265 nm, 255 nm, and 230 nm. This makes UVphotonics one of only a few companies in the world that markets LEDs of these wavelengths in different packages and with lenses. At 230 nm, there is actually only one other supplier.

The company has since expanded its product range to include modules equipped with up to four LEDs with integrated driver circuitry. UVphotonics has also recently developed a flexible UV LED irradiation system. It is ideally suited for applications that require up to four individually controllable light wavelengths.

This modular plug-and-play system can be flexibly equipped with ultraviolet, visible and infrared LEDs to achieve the desired emission spectrum. It can also be expanded to build 1D or 2D arrays.

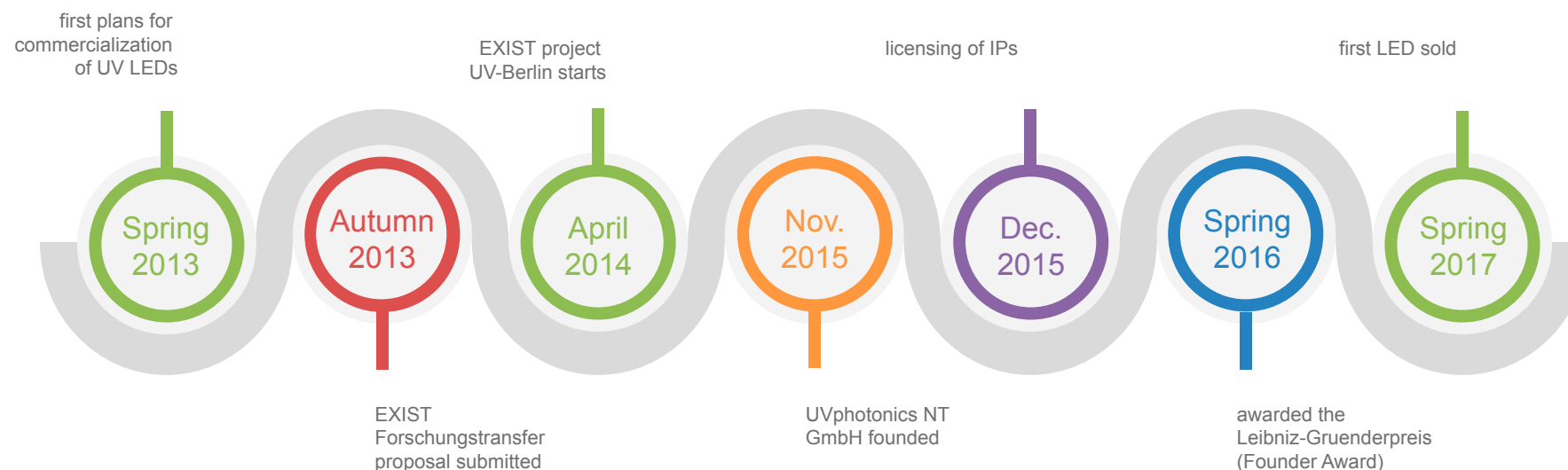
The FBH spin-off meanwhile markets its products in more than ten countries and develops UV LED solutions within various funded projects. UVphotonics is a member of 'Advanced UV for Life', a consortium of some 50 companies and research institutions that aims to advance the technical development, availability and use of UV LEDs on a broad scale. In the German joint project 'CORSA', UVphotonics is also working with partners from industry and research on LED-based solutions to combat the coronavirus.

BeamXpert – ausgezeichnet simulieren

Das jüngste Spin-off BeamXpert hat sich im Dezember 2017 ausgegründet. Mit der Software BeamXpertDESIGNER des Unternehmens lassen sich optische Laserstrahlführungssysteme schnell und exakt auslegen – und so passgenau auf die jeweilige Anwendung zuschneiden. Die Applikationen reichen von Hochleistungslasern im Kilowattbereich über Laserentwicklungen für die Augenmedizin bis hin zu Optiken für die Satellitenkommunikation. Unter einer intuitiven Bedienoberfläche vereint BeamXpertDESIGNER zwei sich ergänzende Modellierungsansätze, die es Nutzerinnen und Nutzern ermöglichen, 3D-Strahlengänge in Echtzeit zu visualisieren und zu analysieren. Per Drag und Drop können hierfür fast 18.000 optische Komponenten verschiedener Hersteller aus der Komponentendatenbank einfach in das Layout eingefügt werden, bis das System optimal konfiguriert ist. Für diese Geschäftsidee wurde BeamXpert in der Gründungsphase mehrfach ausgezeichnet.

Seither hat sich das Unternehmen gut entwickelt und lizenziert seine Software weltweit an Kunden aus Industrie und Forschung. Zum zufriedenen Kundenstamm zählt auch die TRUMPF Lasersystems for Semiconductor Manufacturing GmbH, die die unkomplizierte Software nutzt, um das optische Layout hochkomplexer Laserstrahlquellen zum Erzeugen extrem ultravioletter (EUV) Strahlung für die Waferbelichtung zu entwerfen. Derartige Layouts lassen sich mit BeamXpertDESIGNER nicht nur besonders schnell visualisieren, die Software berücksichtigt auch die Aperturen aller verwendeten Baugruppen. Für die Entwicklung der EUV-Lithografie wurde Trumpf mit weiteren Partnern im November 2020 mit dem Zukunftspreis des Bundespräsidenten ausgezeichnet.

BeamXpert entwickelt seine Software laufend weiter. Zuletzt implementierte das Unternehmen eine Exportfunktion, mit der Komponentendaten und -positionen direkt in kommerzielle



CAD-Programme für mechanische Konstruktionen exportiert werden können sowie ein Optimierungstool, das mehrere Zielgrößen berücksichtigt. Dies beschleunigt den Arbeitsablauf vom Entwurf zum Produkt beim Kunden nochmals.

eagleyard Photonics – mit Hochleistungslaserdioden international erfolgreich

eagleyard Photonics wurde 2002 ausgegründet und ist damit der „alte Hase“ unter den FBH Spin-offs. Das Unternehmen zählt zu den international führenden Anbietern von Hochleistungslaserdioden mit Wellenlängen von 650 nm bis 1120 nm. Die Basis dafür haben die Forschungsleistungen des Ferdinand-Braun-Instituts gelegt. Etwa 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gehören inzwischen zum Team und beliefern Kunden weltweit. Nach mehreren erfolgreichen Finanzierungsrunden ist das Unternehmen seit 2013 Teil der TOPTICA Photonics-Gruppe mit einem Konzernumsatz von mehr als 70 Millionen Euro. Seit 2020 vertreibt das FBH Spin-off seine Laserdioden unter dem Markennamen Toptica eagleyard.

Ob schmalbandig oder Multi-Mode-Laser, Breitstreifenlaser oder Laserbarren, eagleyard fertigt Laserdioden für die verschiedensten Anforderungen und Anwendungen im industriellen Maßstab. Die Produkte vereinen maximale Leistung, höchste Lebensdauer und ausgezeichnete Strahlqualität. Damit sind sie besonders geeignet für medizinische, industrielle, raumfahrttechnische und wissenschaftliche Anwendungen, etwa in der Metrologie, Sauerstoffmesstechnik und Quantentechnologie.

Die Erfolge können sich sehen lassen. So hat eagleyard seine zuverlässigen und robusten DFB-Laserdioden unter anderem

für mehrere anspruchsvolle Weltraum- und Satellitenanwendungen geliefert. Dazu zählt auch die 2013 von der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA gestartete GAIA-Mission, bei der eine dreidimensionale Karte der Milchstraße entstanden ist. Bis heute werden dabei die Positionen, Entfernungen und Bewegungen von etwa einer Milliarde Sterne mit nie dagewesener Präzision vermessen. Auch auf dem Satelliten MERLIN, der 2024 ins All starten wird und die Konzentration des Klimagases Methan in der Atmosphäre messen soll, befinden sich DFB-Laserdioden aus dem Hause eagleyard. Derartige Anwendungen stellen besonders hohe Anforderungen an die Stabilität und Robustheit der Laserdioden. So ist die GAIA-Mission auf 15 Jahre ausgelegt – und über diesen Zeitraum müssen auch die Laserdioden zuverlässig funktionieren.

Ein weiteres Anwendungsfeld sind mobile, hochauflösende 3D-Scanner, die genutzt werden, um Verkehrsunfälle oder Tatorte zu dokumentieren. Die sehr gute Effizienz, die integrierte Strahlformung und zugleich sehr kompakte Bauform der Laserdioden ermöglicht den batteriebetriebenen Einsatz, der für Handheld-Geräte unerlässlich ist.

UVphotonics – ultraviolettes Licht nutzen

Bei der UVphotonics NT GmbH dreht sich alles um Leuchtdioden (LEDs) – mit Fokus auf LEDs im UVB- und UVC-Spektralbereich. Diese Lichtquellen sind vielfältig einsetzbar, von der Wasseraufbereitung, Desinfektion und medizinischen Diagnostik bis hin zur UV-Härtung und Sensorik. Begonnen hat das Unternehmen 2015 mit 310 nm LEDs. Seitdem hat es sein Portfolio schrittweise um die Wellenlängen 300 - 330 nm, 265 nm, 255 nm und 230 nm erweitert. Damit ist UVphotonics eines von wenigen Unternehmen weltweit, das LEDs dieser

Wellenlängen in verschiedenen Gehäusen und mit Linsen vermarktet. Bei 230 nm gibt es sogar nur einen weiteren Anbieter.

Die Produktpalette hat das Unternehmen inzwischen um Module ergänzt, die mit bis zu vier LEDs mit integrierter Treiberschaltung bestückt sind. Außerdem hat UVphotonics erst kürzlich ein flexibel einsetzbares UV-LED-Bestrahlungssystem

entwickelt. Es eignet sich ideal für Anwendungen, die bis zu vier individuell steuerbare Lichtwellenlängen benötigen. Dieses modulare Plug & Play-System kann flexibel mit ultravioletten, sichtbaren und infraroten LEDs bestückt werden, um das gewünschte Emissionsspektrum zu erzielen. Es kann zudem erweitert werden, um 1D- oder 2D-Arrays aufzubauen.

Das FBH Spin-off vertreibt seine Produkte inzwischen in mehr als zehn Ländern und entwickelt UV-LED-Lösungen in verschiedenen Förderprojekten. UVphotonics ist Mitglied in „Advanced UV for Life“, einem Konsortium aus etwa 50 Unternehmen und Forschungseinrichtungen, das die technische Entwicklung, die Verfügbarkeit und den Einsatz von UV-LEDs in breitem Maße voranbringen will. Im deutschen Verbundvorhaben „CORSA“ arbeitet UVphotonics darüber hinaus mit Partnern aus Industrie und Forschung an LED-basierten Lösungen, um das Coronavirus zu bekämpfen.

Multi-wavelength irradiation system that can be flexibly equipped with UV LEDs from FBH or with light-emitting diodes from other suppliers.

Multiwellenlängen-Flächenstrahler, der flexibel mit UV-LEDs aus dem FBH oder mit Leuchtdioden anderer Anbieter bestückt werden kann.



Pushing the boundaries – vertical gallium nitride transistors for power electronics

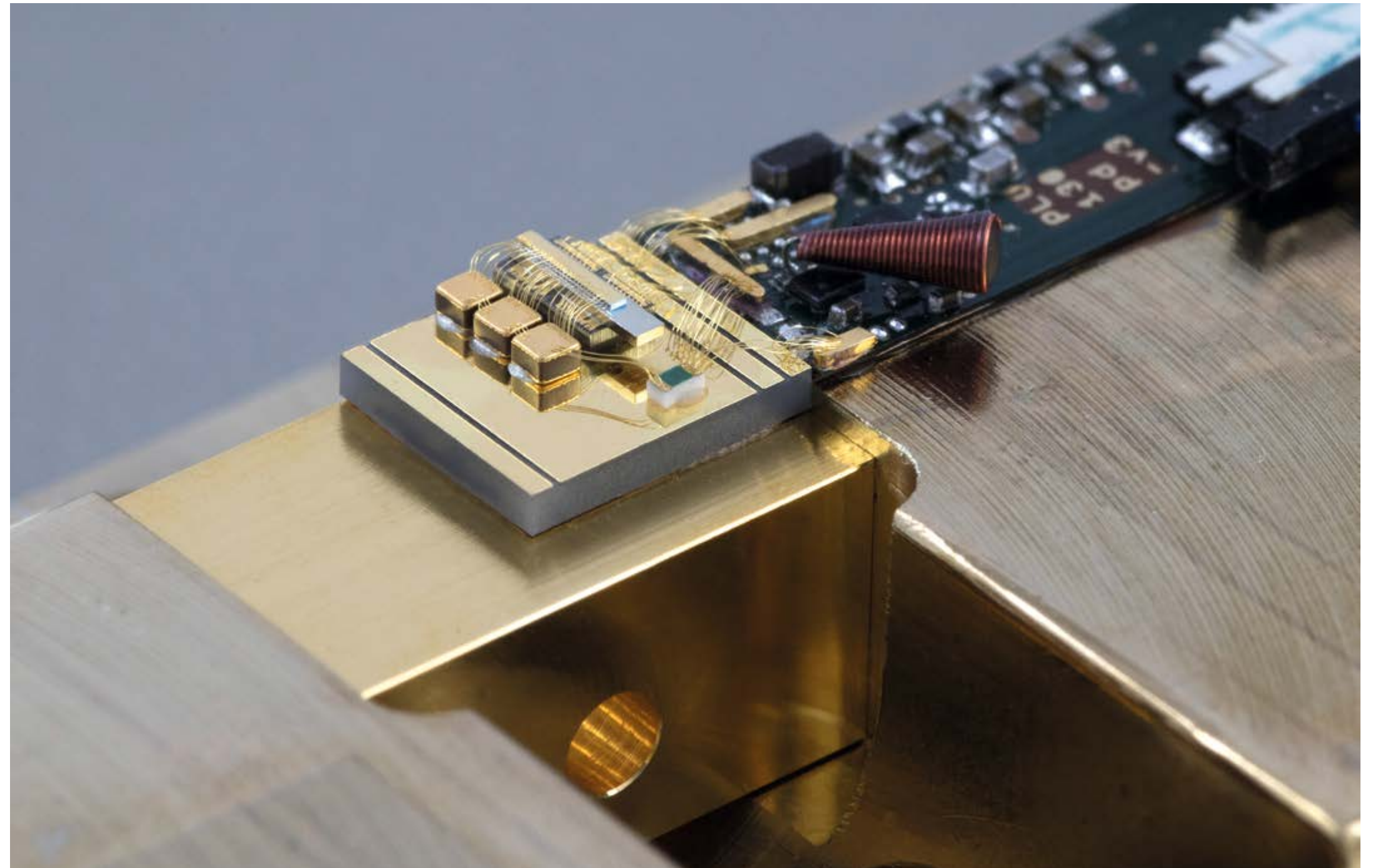
Power semiconductor devices are utilized in power conversion systems and as drivers for high-power optical laser systems. For such devices, a vertical topology is favorable since it combines thick epitaxial layers for blocking high voltage in off-state and very high current density for low resistance during on-state. Moreover, this topology offers low energy consumption and, using the bulk semiconductor, an enhanced thermal dissipation. The FBH made significant progress in exploring and developing vertical transistors based on gallium nitride (GaN) – demonstrating transistor structures with extremely compact dimensions that push the boundaries to what is currently possible.

Until recently, GaN-based power electronic devices used a lateral configuration due to the superior conduction properties of its lateral two-dimensional electron gas. In the future, however, there will also be a large market for vertical GaN devices. For higher operation voltages, such as 1200 V and above, vertical device concepts have distinct advantages as the voltage drops all across the substrate at off-state. This eases design and implementation of high-voltage power switches. They can be, for example, implemented in future electromobility as well as electric aircraft propulsion systems and many other applications. Furthermore, they can be used for direct high-speed laser driving using chip-on-chip integration. In any case, reliability is key. Therefore, FBH developments concentrated on extremely low defective free standing highly conductive GaN substrates. In a first approach, FBH concentrated on the vertical gate drive mechanism and verified this technology for pulsing diode lasers.

Fast vertical laser drivers for LiDAR applications

Very high acquisition-rate long-range LIDAR systems, used for example for autonomous driving, require fast laser driving along with high-power supply electronics. The integration of GaN-based power electronics enables very fast laser drivers with high current densities. Conventional laser assembly architectures do not fulfill these requirements, and thus a new architecture is essential.

FBH scientists invented the concept of chip-on-chip integration of the laser diode mounted on the GaN-based driving power transistor, side by side with very fast high-current energy storage for short and powerful laser pulses. For this innovative assembly concept, new vertical GaN switching transistors have



Vertical GaN MISFET – pulsed laser driver for automotive LiDAR applications.
Vertikaler GaN-MISFET – gepulster Lasertreiber für LiDAR-Anwendungen im Automobilbereich.

» In a first approach, FBH concentrated on the vertical gate drive mechanism and verified this technology for pulsing diode lasers.

been developed and manufactured on highly conductive free standing GaN substrates.

To lay the foundation, the FBH has investigated the influence of substrate type and manufacturing source as well as the gate drive technology on the vertical power switching properties. The transistors have been processed on different substrates with a gate channel orientation along the two GaN non-polar crystal planes, *a*- and *m*-plane. The substrates differ in terms of technology and defect density. Low defective ammonothermal substrates were compared to medium defective hydride vapor phase epitaxy (HVPE) substrates.

It was found that the best performing devices, with a maximum output current above 4 kA/cm² and an area specific onstate resistance of 1.1 mΩ·cm², are manufactured on ammonothermal GaN substrate with the gate channel parallel to the *a*-plane of the GaN crystal. These large periphery switching transistors, with 142 mm gate width and 305 mΩ on-state resistance, were directly combined with a diode laser chip by applying a chip-on-chip mounting technology. The whole arrangement has then been placed on a low-inductance thermally conductive but insulating AlN ceramic board. The demonstrator enabled 3.6 ns laser pulses at 904 nm emission wavelength and a peak optical power of 4 W.

An die Grenze des Machbaren – vertikale Galliumnitrid-Transistoren für die Leistungselektronik

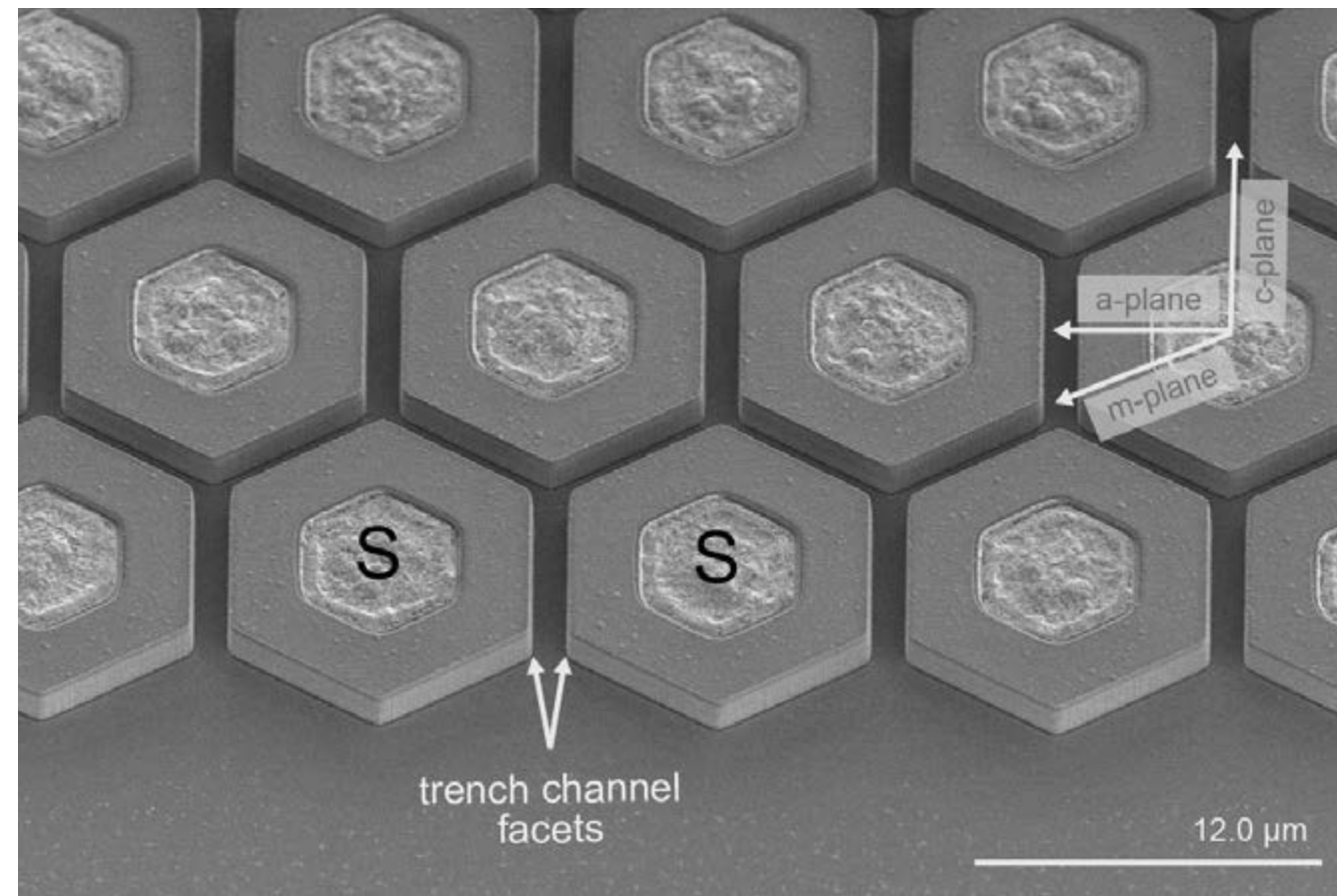
Hochleistungs-Halbleiterbauelemente werden in Konverter-Systemen zur Leistungswandlung und als Treiber für optische Lasersysteme mit hoher Leistung eingesetzt. Eine vertikale Topologie der Bauelemente ist für derartige Anwendungen vorteilhaft. Sie vereinen nämlich dicke Epitaxieschichten zum Sperren hoher Spannungen im Aus-Zustand und eine sehr hohe Stromdichte im eingeschalteten Zustand in einem Bauelement. Darüber hinaus ermöglicht die Topologie geringere Verlustleistungen und, bei Verwendung eines Bulk-

Hexagon structure with *a*-plane orientation on ammonothermal GaN substrate.

Hexagonale Struktur mit Orientierung parallel zur *a*-Ebene auf ammonothermale GaN-Substrat.

Halbleiters, eine verbesserte Wärmeableitung. Bei derartigen vertikalen Transistoren auf Basis von Galliumnitrid (GaN) hat das FBH wesentliche Fortschritte erzielt und Transistorstrukturen mit extrem kompakten Abmessungen demonstriert, die die Grenzen des derzeit Machbaren verschieben.

Bis vor kurzem nutzten GaN-basierte leistungselektronische Bauelemente eine laterale Konfiguration. Der Grund dafür liegt in den hervorragenden Leitungseigenschaften des lateralen zweidimensionalen Elektronengases. Jedoch steigen die Marktaussichten für vertikale GaN-Bauelemente. Weil die Spannung im Aus-Zustand über das gesamte Substrat abfällt, bieten vertikale Bauelementkonzepte bei höheren Betriebsspannungen von 1200 V und darüber deutliche Vorteile. Sie



vereinfachen das Design, und Hochspannungs-Leistungsschalter können implementiert werden. Unter anderem können sie in der zukünftigen Elektromobilität sowie in elektrischen Flugzeugantrieben und vielen weiteren Anwendungen eingesetzt werden. Weiterhin bieten vertikale Bauelemente die Möglichkeit einer einfachen Chip-auf-Chip-Integration. Sie sind daher attraktiv für die direkte Ansteuerung von Diodenlasern, um ultrakurze Lichtpulse (LIDAR) zu erzeugen.

Entscheidend ist in jedem Fall die Zuverlässigkeit der Bauelemente. Daher konzentriert das FBH seine Entwicklungen auf extrem defektarme, freistehende und hochleitfähige GaN-Substrate. Der vertikale GaN-Treibermechanismus steht bei einem ersten Ansatz im Fokus – diese Technologie hat das FBH nun für gepulste Diodenlaser nachgewiesen.

» Bei derartigen vertikalen Transistoren auf Basis von Galliumnitrid hat das FBH wesentliche Fortschritte erzielt und Transistorstrukturen mit extrem kompakten Abmessungen demonstriert, die die Grenzen des derzeit Machbaren verschieben.

Schnelle vertikale Lasertreiber für LiDAR-Anwendungen

LIDAR-Systeme mit sehr hoher Erfassungsrate und großer Reichweite, die unter anderem beim autonomen Fahren eingesetzt werden, benötigen schnelle Lasertreiber und eine leistungsstarke Versorgungselektronik. Durch Integration von GaN-basierter Leistungselektronik sind sehr schnelle Lasertreiber mit hohen Stromdichten möglich. Diese Anforderungen erfüllen jedoch Laserbaugruppen mit herkömmlichen Architekturen nicht, weshalb ein neuer Aufbau gefragt ist.

Das FBH entwickelte das Konzept für eine Chip-auf-Chip-Integration eines Diodenlasers mit einem vertikalen GaN-Transistor, der als schneller Treiber dient. Die Konfiguration ist direkt neben einem sehr schnellen Hochstrom-Energiespeicher platziert und erzeugt kurze und intensive Laserpulse. Für dieses innovative Aufbaukonzept wurden neue vertikale GaN-Schalttransistoren entwickelt und auf hochleitfähigen freistehenden GaN-Substraten hergestellt.

Um die Basis dafür zu schaffen, hat das FBH zunächst den Einfluss von Substrattyp und Hersteller untersucht. Auch die Auswirkungen der Gate-Ansteuerungstechnologie auf die vertikalen Leistungsschalteigenschaften wurden eingehend geprüft. Die Transistoren wurden auf verschiedenen Substraten mit einer Gate-Kanal-Orientierung entlang der beiden unpolaren GaN-Kristallebenen, *a*- und *m*-Ebene, prozessiert. Diese Trägermaterialien unterscheiden sich hinsichtlich

Technologie und Defektdichte: Ammonothermale Substrate mit geringer Defektdichte wurden mit Substraten mit mittlerer Defektdichte aus der Hybrid-Gasphasenepitaxie (HVPE) verglichen.

Die leistungsstärksten Bauelemente mit einem maximalen Ausgangsstrom von über 4 kA/cm² und einem flächenspezifischen Einschaltwiderstand von 1,1 mΩ·cm² konnten auf ammonothermale GaN-Substrat demonstriert werden. Der Gate-Kanal verlief dabei parallel zur *a*-Ebene des Kristalls. Großflächige Schalttransistoren mit 142 mm Gatebreite und 305 mΩ Einschaltwiderstand wurden mittels Chip-auf-Chip-Montage direkt mit einem Diodenlaserchip kombiniert. Die gesamte Anordnung wurde dann auf einer niederinduktiven, thermisch leitfähigen, aber isolierenden AlN-Keramikplatte angeordnet. Der Demonstrator lieferte bei 904 nm Emissionswellenlänge 3,6 ns kurze Laserpulse mit einer optischen Spitzenleistung von 4 W.



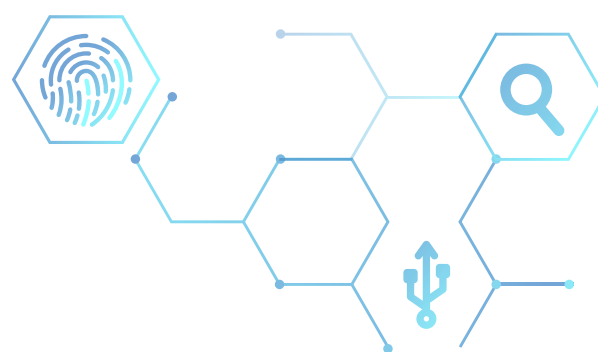
Pushing digitization – digital modulator for beamforming in 5G/6G

Digital technology brings substantial advantages in terms of flexibility and energy efficiency over pure analog circuitry. This benefit is exploited increasingly also in microwave radios for 5G/6G. By pushing the digital-analog boundary towards the antenna end of the RF transmitter (Tx) chain, these advances become accessible in areas that previously were the exclusive domain of analog implementations. One of the major benefits of digital electronics is the simplicity with which arbitrary delays can be introduced into signal chains. This feature can be used to create a multitude of time-delayed data streams for phased array antenna systems in digital beamforming networks with minimum effort. In such a network, all delay units of an analog beamformer are absorbed into a single digital PA modulator. This significantly reduces the form factor and enhances flexibility.

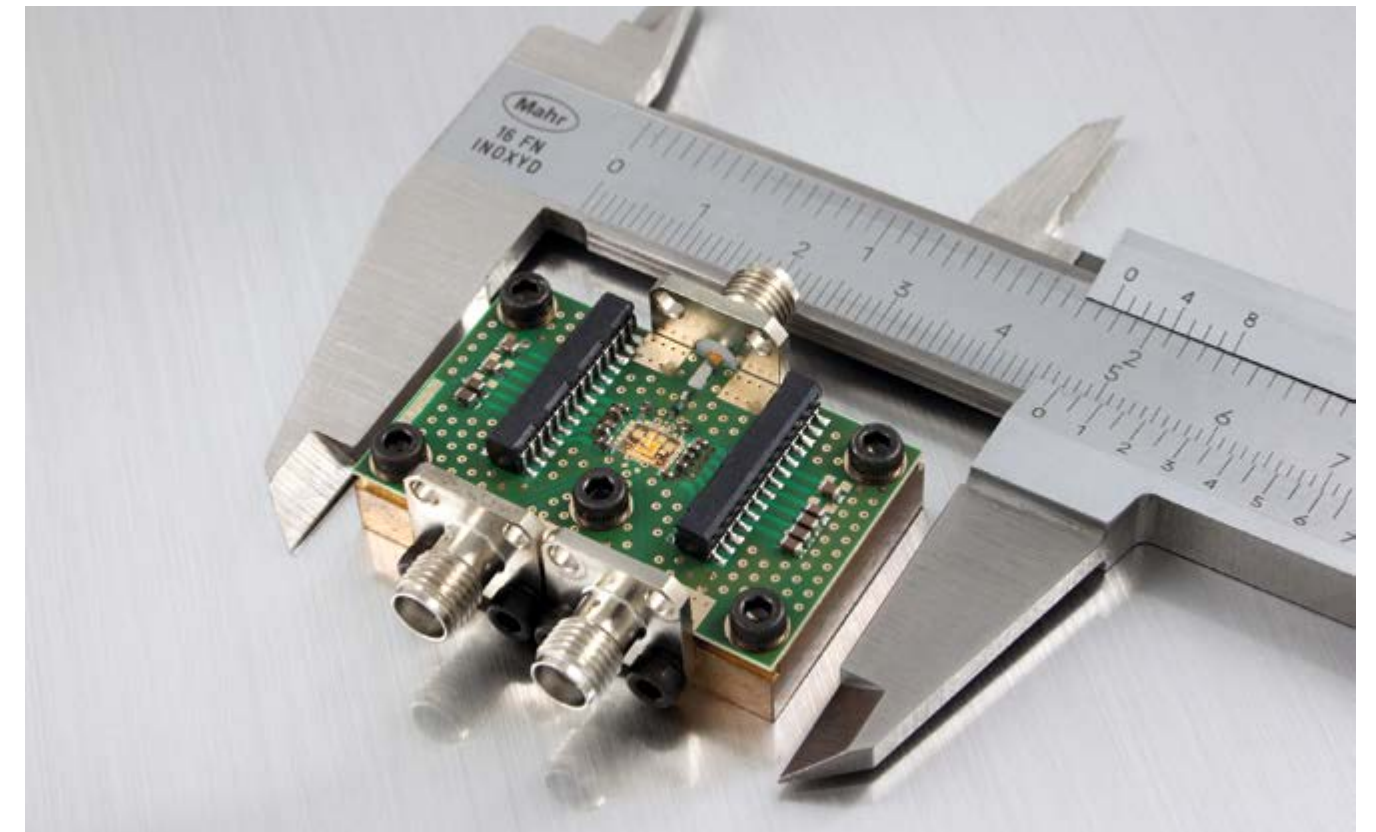
FBH has invented and continuously developed a modulator concept for fully digital Tx chains in the last years. This modulator is fully transparent to any baseband signal and modulation type and translates it with high amplitude resolution into a binary high-speed bitstream. Dr. Florian Hühn did his PhD on this subject and was awarded one of the three 2020 Adlershof Disser-

tation Prizes. But the capabilities of this modulator go even further. It can easily realize several of such output streams, with time delays with ps accuracy between the branches.

In 2020, this was demonstrated in the 1 GHz range, using modified pulse generator units of FBH's patented modulator and two digital Tx chains. Each chain is driven with a modulated signal and contains a digital PA module including band-pass filter. Measurements show that the requested delay values are reproduced very precisely with maximum 2 ps deviation, without any amplitude variation and highest linearity of more than 50 dB. As the modulator can be easily extended to multiple chains it offers an interesting building block for next-generation digital phased-array systems.



Die Digitalisierung vorantreiben – digitaler Modulator für Beamforming in 5G/6G



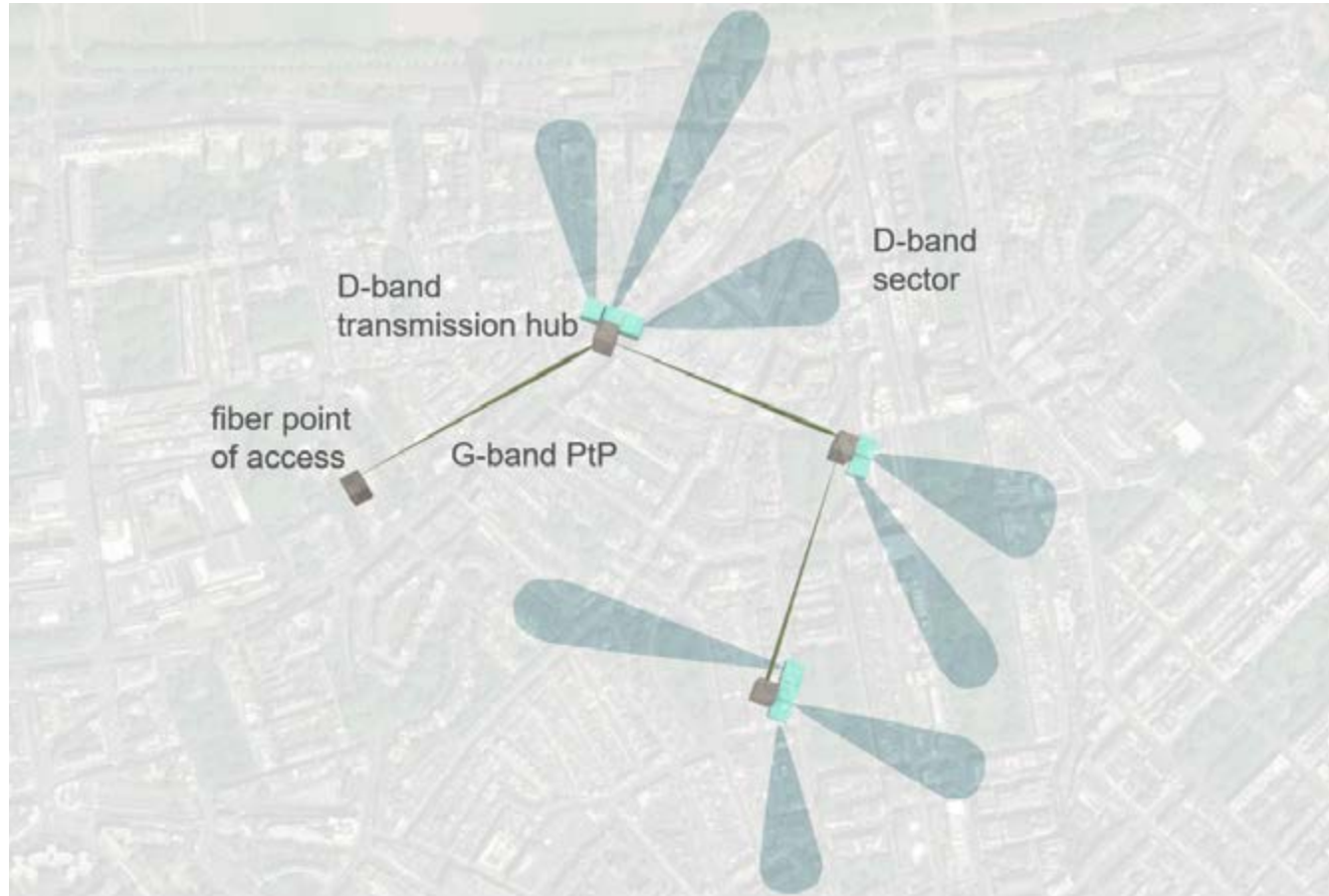
🔍 Digital Tx module used in the realization.
Digitales Tx-Modul, das für die Realisierung verwendet wurde.

Die Digitaltechnik bietet erhebliche Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Energieeffizienz gegenüber rein analogen Schaltungen. Diese Vorzüge werden zunehmend in der Mikrowellen-Funktechnik für 5G/6G genutzt. Inzwischen verschiebt sich die Digital-Analog-Grenze zunehmend in Richtung des Endes der HF-Senderkette (Tx) kurz vor die Antenne. Daher werden die Fortschritte dieser digitalen Technologien nun für Bereiche zugänglich, die bislang exklusiv analogen Implementierungen vorbehalten waren. Einer der Hauptvorteile der digitalen Elektronik ist, dass beliebige Verzögerungen in Signalketten sehr einfach eingeführt werden können. Dank dieser Eigenschaft lassen sich mit minimalem Aufwand eine Vielzahl von zeitverzögerten Datenströmen für Phased-Array-Antennensysteme in digitalen Beamforming-Netzwerken erzeugen. In einem solchen Netzwerk werden alle Verzögerungseinheiten eines analogen Beamformers in einem einzigen digitalen PA-Modulator absorbiert. Dies reduziert den Formfaktor erheblich und erhöht die Flexibilität.

Das FBH hat in den letzten Jahren ein Modulatorkonzept für voll-digitale Tx-Ketten erfunden und kontinuierlich weiterentwickelt. Dieser Modulator ist vollständig transparent für beliebige Basisbandsignale und Modulationsarten und setzt diese

mit hoher Amplitudenauflösung in einen binären Hochgeschwindigkeits-Bitstrom um. Dr. Florian Hühn hat über dieses Thema promoviert und wurde dafür mit einem der drei Adlershofer Dissertationspreise 2020 ausgezeichnet. Dieser Modulator kann jedoch noch viel mehr, etwa problemlos mehrere solcher Ausgangsströme realisieren – mit Zeitverzögerungen mit ps-Genauigkeit zwischen den Zweigen.

Im Jahr 2020 wurde dies im 1-GHz-Bereich mit modifizierten Pulsgeneratoreinheiten des patentierten FBH-Modulators und zwei digitalen Tx-Ketten demonstriert. Jede Kette wird mit einem modulierten Signal angesteuert und enthält ein digitales PA-Modul inklusive Bandpassfilter. Messungen zeigen, dass die geforderten Verzögerungswerte sehr präzise mit maximal 2 ps Abweichung, ohne jegliche Amplitudenvariation und mit höchster Linearität von mehr als 50 dB reproduziert werden. Da der Modulator leicht auf mehrere Ketten erweitert werden kann, bietet er einen interessanten Baustein für digitale Phased-Array-Systeme der nächsten Generation.



ULTRAWAVE layer concept based on a D-band PtM plus a G-Band PtP high capacity link. ULTRAWAVE-Layer-Konzept basierend auf einem D-Band-PtM- plus einem G-Band-PtP-Link mit hoher Kapazität.

High-performance InP circuits for modern communications

Tomorrow's wireless communications in 5G and especially the future 6G standard call for a high-performance infrastructure hardware including circuits at millimeter waves. Their performance cannot be realized with standard technologies such as CMOS or BiCMOS. FBH has developed an InP-DHBT process for this purpose, which provides circuits that meet the requirements of the new wireless communication applications – in terms of output power, bandwidth and noise.

These circuits are being used as part of the ULTRAWAVE project. In this project, a European consortium is developing a novel system architecture for wireless communications that will provide better network coverage and unprecedented data rates. The performance of the MMICs developed at FBH has been demonstrated by realizing an exemplary power amplifier and an upconverter for the D-band. These MMICs provide output powers > 20 mW in the 140 – 160 GHz range and a conversion gain of > 10 dB with a mixer output power of > 5 dBm. This makes

them ideal for a point-to-multipoint infrastructure in the D-band at 145 GHz. With this infrastructure, large areas can be covered with high data rates, which would otherwise only be possible with an extraordinarily large number of point-to-point connections.

The system architecture offers 100 Gbps for local access points within a radius of one square kilometer. This is to be demonstrated for the first time in a test trial in Valencia – point-to-point systems in the same frequency band have already been shown by other groups in initial trials. The ULTRAWAVE system uses standard modem access and enables wireless data transmission up to one kilometer.

Leistungsfähige InP-Schaltungen für die moderne Kommunikation

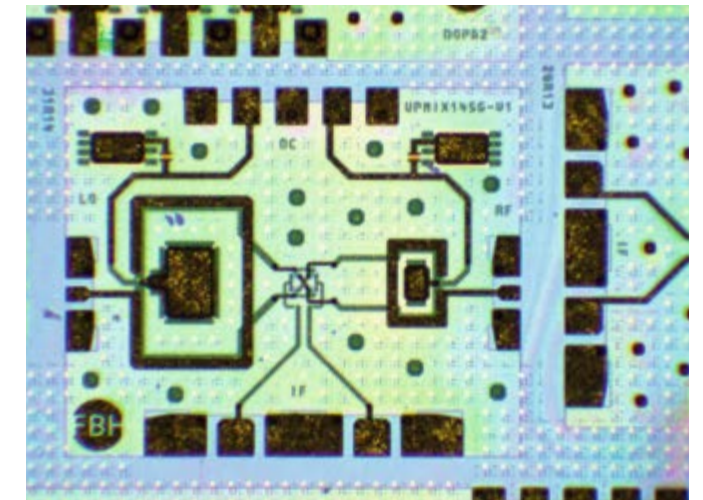
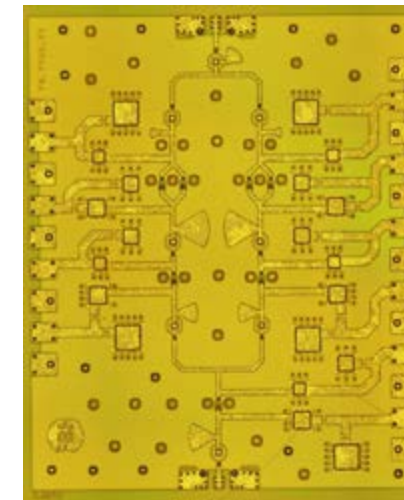
Die drahtlose Kommunikation von morgen im Mobilfunkstandard 5G und speziell dem zukünftigen 6G benötigt eine Infrastruktur mit leistungsfähiger Hardware. Dazu zählen auch Schaltungen bei Millimeterwellen, die nicht mit Standardtechnologien wie CMOS oder BiCMOS realisiert werden können. Das FBH hat einen InP-DHBT-Prozess entwickelt, der Schaltungen bereitstellt, die die Erfordernisse der neuen drahtlosen Kommunikationsanwendungen erfüllen – hinsichtlich Ausgangsleistung, Bandbreite und Rauschen.

Diese Schaltungen werden im Rahmen des ULTRAWAVE-Projektes eingesetzt. Dabei entwickelt ein europäisches Konsortium eine neuartige Systemarchitektur für die drahtlose Kommunikation, die für bessere Netzabdeckung und nie dagewesene Datenraten pro Fläche sorgt. Die Leistungsfähigkeit der am FBH entwickelten MMICs wird hier beispielhaft an einem Leistungsverstärker und einem Aufwärtsmischer für das D-Band demonstriert. Diese MMICs liefern Ausgangsleistungen > 20 mW im Bereich 140 – 160 GHz und einen Konversionsgewinn von > 10 dB bei einer Ausgangsleistung des Mischers von > 5 dBm. Damit eignen sie sich ideal für die

Point-to-Multipoint-Infrastruktur im D-Band bei 145 GHz. Mit dieser Infrastruktur lassen sich große Gebiete mit einer hohen Datenrate abdecken, was sonst nur mit außerordentlich vielen Point-to-Point-Verbindungen möglich wäre.

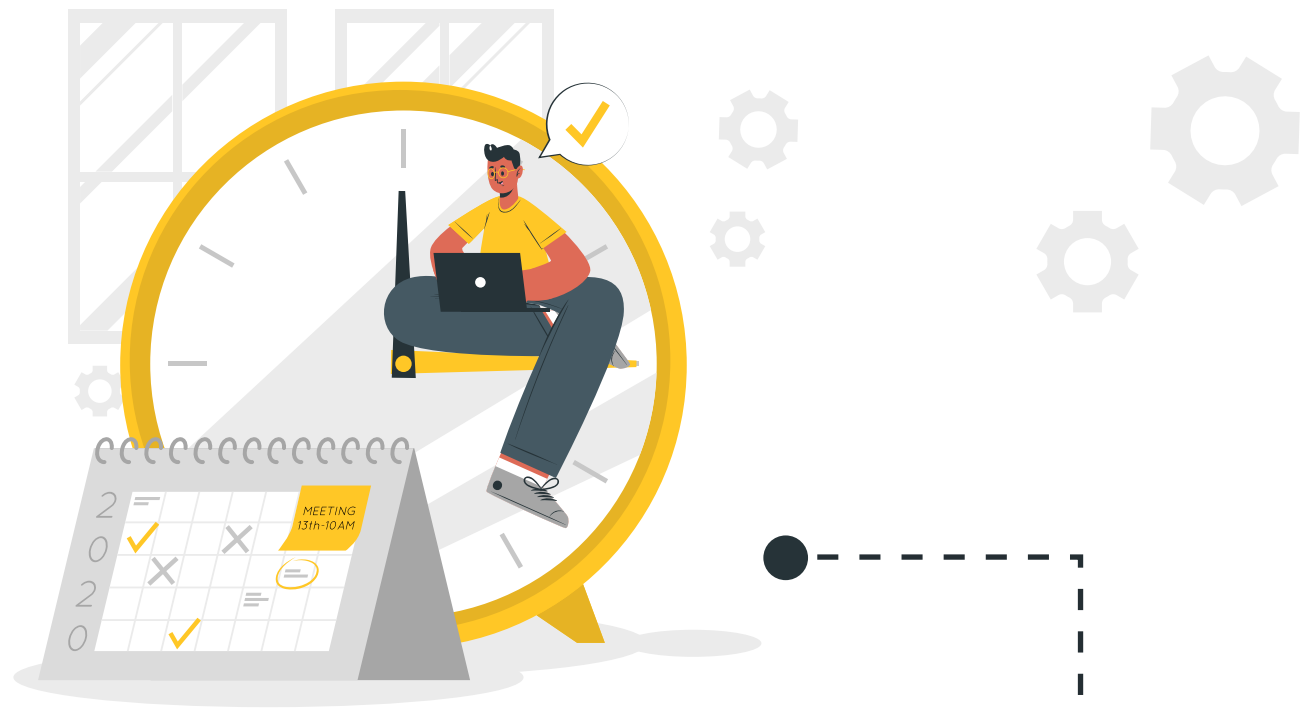
Die Systemarchitektur bietet 100 Gbps für ortsfeste Teilnehmer im Umkreis von einem Quadratkilometer. Dies soll erstmalig in einem Testversuch in Valencia erreicht werden – Point-to-Point-Systeme im gleichen Frequenzband wurden von anderen Gruppen bereits in ersten Versuchen demonstriert. Das ULTRAWAVE-System nutzt einen Standard-Modemzugang und ermöglicht die drahtlose Datenübertragung bis zu einem Kilometer.

Realized power amplifier at 140 - 160 GHz (left); upconverter for 140 - 160 GHz with 50 GHz intermediate frequency (right). Realisierter Leistungsverstärker bei 140 - 160 GHz (links); Aufwärtsmischer für 140 - 160 GHz mit 50 GHz Zwischenfrequenz (rechts).



FBH has developed an InP-DHBT process for this purpose, which provides circuits that meet the requirements of the new wireless communication applications – in terms of power, bandwidth and noise.

Modern ways of working



In 2020, the coronavirus turned the working environment of numerous people upside down – with stores often closed and offices deserted. At FBH, too, many of the 350 employees had and partially still have moved their workplaces to their kitchen table or desk at home. The technical colleagues, however, continue to keep the cleanroom running in permanent teams even during times of lockdown. Thanks to rapid reorganization and prudent adjustments to the respective infection situation, the institute has come through the crisis well to date. It has been able to maintain cleanroom operations and services for customers and partners almost without any restriction. Last but not least, FBH has also created the basis for modern and flexible ways of working at the institute.

Future-proof IT infrastructure

The fact that relocating the workplace from one day to the next worked so well is also thanks to the course set by the institute's in-house IT group. The five team members had installed a new firewall in fall 2019. In this process, the prerequisites for a 'virtual private network' – VPN for short – had been created. It secures access to the institute's network and to data and software at FBH. VPN access is provided via a dedicated portal to a remote desktop environment. Over the past year, this environment has been expanded and now distributes the load of

the increased external access via a flexibly scalable server farm. This way, the IT team ensured that the institute remained fully operational and accessible in recent months.

The necessary security is provided by a so-called bastion host, which is particularly well protected against attacks. This server acts as an intermediate instance to which all connections from outside are first routed. The good experience with the IT infrastructure has shown that FBH is well positioned even in the event of a crisis. Today, colleagues work flexibly from home or at the institute, depending on the requirements. Thanks to the technical prerequisites, it is also easier to reconcile work and private commitments – childcare or homeschooling, for example. IT is already working on even more convenient solutions. For example, employees shall be able to access the entire institute network directly from anywhere using the institute's own laptops.

>> *The necessary security is provided by a so-called bastion host, which is particularly well protected against attacks. This server acts as an intermediate instance to which all connections from outside are first routed.*

Digitalizing administrative processes

The IT group was also instrumental in smoothly adopting digital administrative processes. The prerequisites to this end have been created in recent years in collaboration with Forschungsverbund Berlin. Since then, more than 1,500 annual procurement and contract tendering processes can be handled completely paperless, from requesting a quote to awarding the contract – including an interface to SAP with almost 12,000 bookings in 2020. Also, nearly 4,500 invoices were processed completely electronically and paid via online banking.

When FBH 2021 transformed into a gGmbH, this step was also connected to leaving the Forschungsverbund Berlin. However, proven administrative processes and systems used within Forschungsverbund, by the FBH administration and its employees, were to be continued in order to be able to start the independence without media discontinuity. Therefore, FBH established the corresponding administrative systems at the institute itself. Within a few months, thanks to the good cooperation between administration, the IT teams of FBH and Forschungsverbund, and with the support of external service providers, it was possible to transfer the systems to an operational state – and thus ensure that all administrative processes continued to function smoothly.



Modernes Arbeiten

Das Corona-Virus hat 2020 die Arbeitswelt unzähliger Menschen auf den Kopf gestellt – Geschäfte blieben vielfach geschlossen und Büros verwaist. Auch am FBH hatten und haben viele der 350 Mitarbeitenden ihren Arbeitsplatz zumindest teilweise an den heimischen Küchen- beziehungsweise Schreibtisch verlagert. Die technischen Kolleginnen und Kollegen hielten jedoch auch in Zeiten des Lockdowns den Betrieb im Reinraum in festen Teams am Laufen. Durch das schnelle Umschalten und umsichtige Anpassungen an die jeweilige Infektionslage ist das Institut bis heute gut durch die Krise gekommen. Es ist gelungen, den Reinraumbetrieb und die Services für Kunden und Partner beinahe uneingeschränkt aufrecht zu erhalten. Nicht zuletzt hat das FBH in diesem Zuge auch die Basis für modernes und flexibles Arbeiten am Institut geschaffen.

Zukunftsfähige IT-Infrastruktur

Dass die Verlagerung des Arbeitsplatzes von heute auf morgen so gut funktioniert hat, ist auch den Weichenstellungen der institutseigenen IT-Gruppe zu verdanken. Die fünf Kolleginnen und Kollegen im Team hatten im Herbst 2019 eine neue Firewall installiert. In diesem Zusammenhang wurden auch die Voraussetzungen für ein „virtuelles privates Netzwerk“ – kurz VPN – geschaffen. Es sichert den Zugriff auf das Institutsnetzwerk sowie auf Daten und Software am FBH. Der VPN-Zugang erfolgt über ein eigenes Portal auf eine Remote-Desktop-Umgebung. Diese wurde im vergangenen Jahr ausgebaut und verteilt die Last der gestiegenen Zugriffe von außen über eine flexibel skalierbare Serverfarm. Damit sorgte das IT-Team dafür, dass das Institut in den letzten Monaten uneingeschränkt arbeitsfähig und erreichbar blieb.

Für die nötige Sicherheit sorgt ein so genannter Bastion Host, der besonders gut gegen Angriffe geschützt ist. Dieser Server dient als Zwischeninstanz, auf den alle Verbindungen von außen zunächst geleitet werden. Die guten Erfahrungen mit der IT-Infrastruktur haben gezeigt, dass das FBH auch in Krisen gut aufgestellt ist. Heute arbeiten die Kolleginnen und Kollegen, je nach Erfordernis, flexibel und coronagerecht von zu Hause aus oder vor Ort. Dank der technischen Voraussetzungen lassen sich auch Job und private Verpflichtungen – Kinderbetreuung oder Homeschooling beispielsweise – besser vereinbaren. Die IT feilt schon an weiteren, noch komfortableren Lösungen. Mit institutseigenen Laptops sollen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beispielsweise von überall direkt auf das gesamte Institutsnetz zugreifen können.



PHP

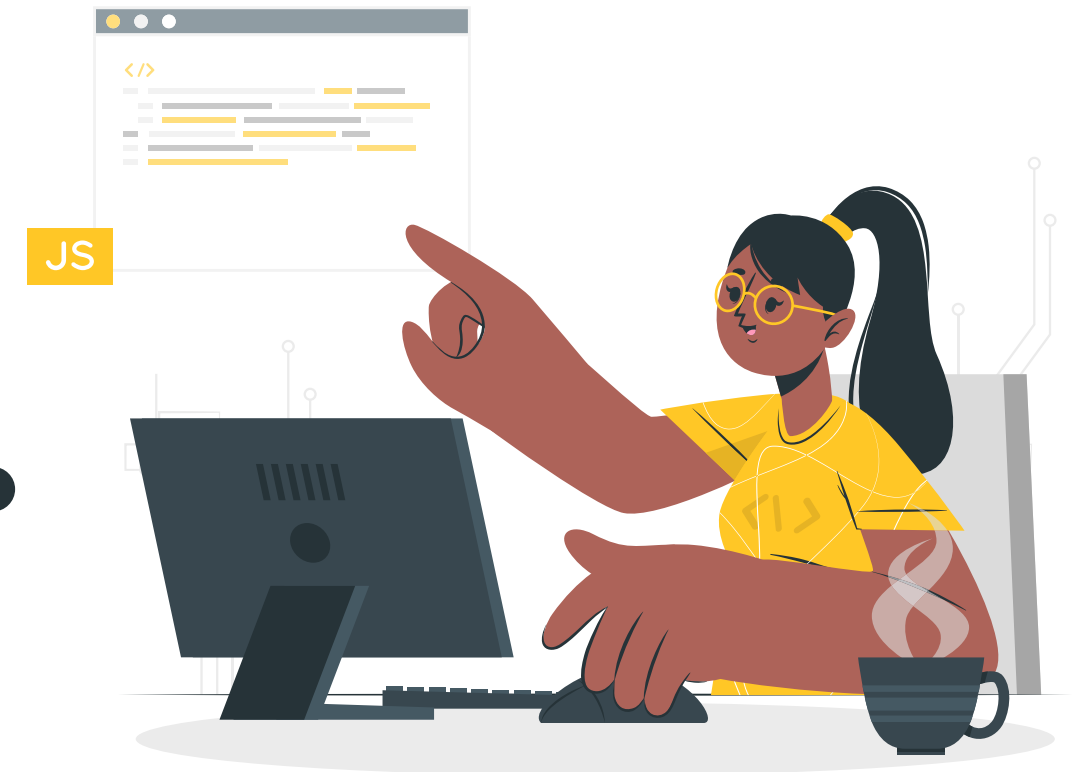
» Für die nötige Sicherheit sorgt ein so genannter Bastion Host, der besonders gut gegen Angriffe geschützt ist. Dieser Server dient als Zwischeninstanz, auf den alle Verbindungen von außen zunächst geleitet werden.

Verwaltungsabläufe digitalisieren

Die IT-Gruppe war auch maßgeblich in die reibungslose Übernahme digitaler Verwaltungsabläufe eingebunden. Die Voraussetzungen dafür wurden in den letzten Jahren in Zusammenarbeit mit dem Forschungsverbund Berlin geschaffen. Seither lassen sich die jährlich mehr als 1.500 Beschaffungsvorgänge und Vergaben komplett papierlos erledigen, vom Einholen des Angebotes bis hin zur Auftragserteilung – inklusive Schnittstelle ins SAP mit fast 12.000 Buchungen im Jahr 2020. Auch knapp 4.500 Rechnungen wurden vollständig elektronisch bearbeitet und per Online-Banking bezahlt.

Mit der Umfirmierung des FBH 2021 zur gGmbH war auch der Austritt aus dem Forschungsverbund verbunden. Die im Verbund, für die FBH-Verwaltung und die Mitarbeitenden bewährten Verwaltungsabläufe und -systeme sollten jedoch beibehalten werden, um medienbruchfrei in die Eigenstän-

digkeit starten zu können. Daher hat das FBH die entsprechenden Verwaltungssysteme am Institut selbst etabliert. Binnen weniger Monate ist es dank der guten Zusammenarbeit von Verwaltung, der IT-Teams von FBH und Forschungsverbund sowie mit Unterstützung externer Dienstleister gelungen, die Systeme lauffähig zu übertragen – und so sicherzustellen, dass alle Verwaltungsabläufe weiter reibungslos funktionieren.



Photonics

Photonik

Within its photonics research area, FBH covers a broad range of diode laser and light-emitting diodes (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 violet and UV spectral range. The FBH currently focuses on the following topics:

Im Forschungsbereich Photonik deckt das FBH 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 setzt das FBH die folgenden Schwerpunkte:

- > **High-power diode lasers** – broad area lasers, laser bars, and stacks optimized for high output powers. They are used as pump lasers as well as for direct materials processing.
- > **Laser modules** – 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** – FBH develops diode lasers for the violet and UV LEDs for the UVB and UVC spectral range. Applications eligible for LEDs include disinfection and plant irradiation.
- The required basic know-how for these developments is provided by the Optoelectronics Department. It designs, realizes and characterizes the corresponding diode lasers.

- > **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 werden Optiken zur Strahlformung, externe Resonatoren, Elektronik und frequenzverdoppelnde Kristalle hochpräzise integriert. Auch die anschließende Kopplung in Glasfasern ist möglich. Sie 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 entwickelt das FBH Diodenlaser für den violetten und UV-Leuchtdioden, für den UVB- und UVC-Spektralbereich. Die LEDs eignen sich u. a. für die Desinfektion und die Pflanzenbestrahlung.
- Das erforderliche grundlegende Know-how hält das Department Optoelektronik bereit. Es entwirft, realisiert und charakterisiert die zugehörigen Diodenlaser.

High-brightness nanosecond-pulse operation from tapered ridge-waveguide lasers for LiDAR applications

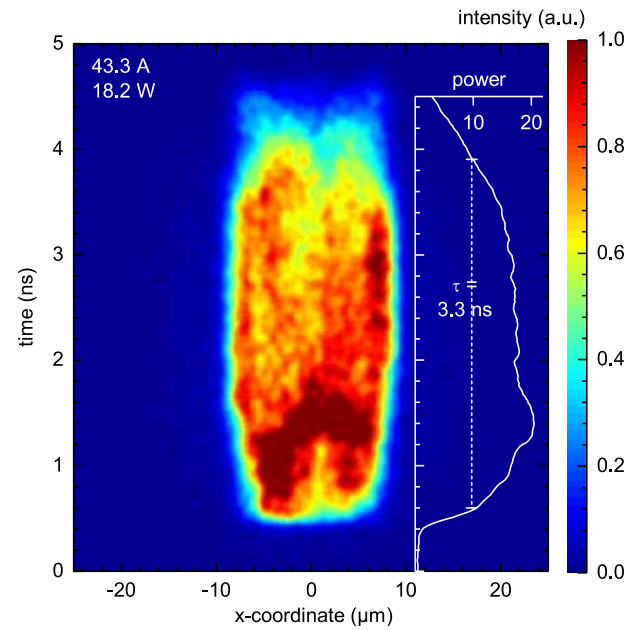


Fig. 1. Time-resolved measurement of the optical field intensity at the output facet measured at a pulse power of 18.2 W and an injection current of 43.3 A. Inset: Total output power as function of time for the 3.3 ns long pulse.

Diode lasers generating optical pulses that are several nanoseconds long with high optical peak powers and good beam quality are key components for scanning light detection and ranging (LiDAR) systems used in autonomous driving or robotics. For object detection, these systems emit short laser pulses, which are reflected by the object and then measured by the system. From the time difference between emission of the laser pulse and return of the reflected light, the distance to the object can be determined.

Generally, the power that is emitted from a diode laser increases with the lateral width of the emission region. However, with in-

creasing stripe width the lateral beam quality degrades. The beam quality quantifies how well a laser beam can be focused. It is determined by the product of the half width of the emitted field at the laser facet ($w/2$) and half the emission angle of the laser beam ($\Theta/2$). If the product of the two $w\cdot\Theta/4$ is small, the beam quality is good. As it determines the spatial resolution of the scanning laser system, a good beam quality is essential.

In short-pulse operation, the laser design requirements differ compared to continuous laser operation because nearly no heat is generated within the laser. An important difference is the lack of a thermally induced waveguide, which stops the light from being radiated to the sides under continuous-wave (CW) operation.

At the FBH, an existing design has been optimized that showed excellent beam characteristics under CW conditions. An exemplary top view sketch of these lasers is shown in Fig. 2. The laser light is emitted through the front facet that has a very low reflectivity and is reflected at the rear facet with a high reflectivity. In this laser resonator, the light propagates in longitudinal z-direction. On the left and right sides of the regions where current is injected (gold colored), an index-guiding trench is etched (light grey colored) to prevent laser light from being radiated to the sides. For pulsed operation, the index-guiding trench width was enlarged to guide the laser light effectively in the absence of a thermally induced waveguide.

The laser is separated into three sections (see Fig. 2): The ridge-waveguide (RW) section with $5\ \mu\text{m}$ width is narrow enough to support only the fundamental lateral mode and can thus act as a mode filter to ensure a good beam quality. In the tapered section, the injection stripe is enlarged so that it reaches $23\ \mu\text{m}$ in the front section. In this way, the power density within the front section is reduced compared to a narrow stripe, and the laser can reach higher powers without failure.

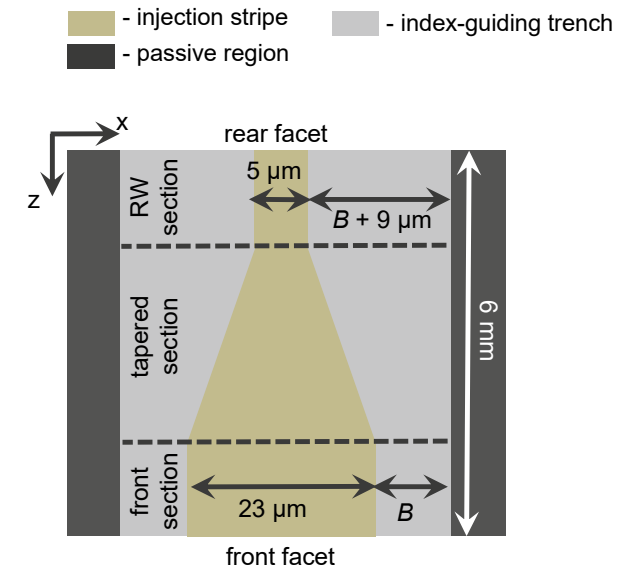


Fig. 2. Top view sketch of the investigated laser structure that has a ridge-waveguide (RW) section, a tapered section and a front section. For adaption to pulsed operation, the index-guiding trench width B was enlarged.

Optical pulses of 3.3 ns length and an output power of more than 18 W can be achieved with these lasers. An exemplary time-resolved measurement of the optical field intensity at the output facet is shown in Fig. 1, measured at a pulse power of 18.2 W and an injection current of 43.3 A. The inset shows the power as function of time. To determine the beam quality of the laser light, the field intensity at the output facet is integrated over the pulse (Fig. 3 left) and the angle-resolved field intensity of the laser beam in the distance is measured (Fig. 3 right). Both agree very well with simulations. The full experimental near-field width is $w = 18.5\ \mu\text{m}$, and the full far-field angle $\Theta = 8.3^\circ$. This results in a very good beam quality, given the high output power of more than 18 W.

This work was supported by the German Space Agency DLR with funds provided by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) under grant number 50RA1924 and by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the project reference 16FMD02 (Research Fab Microelectronics Germany – FMD).

Publications

A. Zeghuzi, H. Christopher, A. Klehr, J.-P. Koester, H. Wenzel, A. Knigge, "High-Brightness Nanosecond-Pulse Operation From Tapered-Ridge-Waveguide Lasers", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 3, pp. 151–54, (2021).

H. Christopher, A. Zeghuzi, A. Klehr, J.-P. Koester, H. Wenzel, A. Knigge, "Experimental investigation of nanosecond pulsed tapered-waveguide lasers obtaining extremely high brightness values," CLEO/Europe-EQEC (2021).

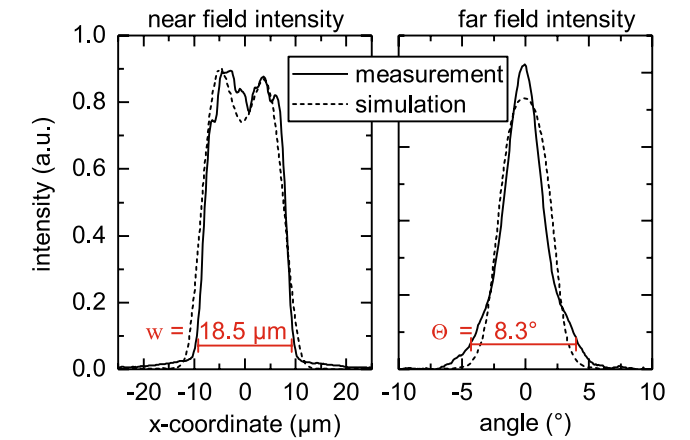


Fig. 3. Comparison of experimental and simulated lateral near- and far-field intensity profiles. The experimental near-field width is $18.5\ \mu\text{m}$ and the far-field angle $\Theta = 8.3^\circ$.

LiDAR-Systeme sind wichtige Komponenten, die unter anderem zur Abstandsmessung beim autonomen Fahren genutzt werden. Hierbei sendet das LiDAR-System einen Laserpuls aus, der von einem beliebigen Objekt reflektiert und dann vom System gemessen wird. Über die Zeit, die von der Emission bis zur Detektion vergeht, kann der Abstand zum Objekt bestimmt werden. Derartige Systeme benötigen Lichtquellen, welche Pulse von nur wenigen Nanosekunden Länge erzeugen. Zugleich müssen sie hohe Leistungen und eine gute Strahlqualität bieten. Die Strahlqualität ist ein Maß, wie gut sich der Laserstrahl fokussieren lässt und bestimmt so die räumliche Auflösung der Abstandsmessung.

Die Anforderungen an die Bauweise eines Lasers im gepulsten Betrieb unterscheiden sich von jenen im kontinuierlichen Betrieb, da keine Wärme entsteht. So gibt es beispielsweise keinen thermisch induzierten Wellenleiter, der dafür sorgt, dass das Licht nicht seitlich abstrahlt. Am FBH wurde kürzlich ein bestehendes Design, das ursprünglich für die Emission von kontinuierlicher Laserstrahlung konzipiert war, für den gepulsten Betrieb optimiert. Damit ist es gelungen, optische Pulse von nur 3,3 Nanosekunden Länge bei einer sehr hohen Ausgangsleistung von mehr als 18 Watt zu erzeugen – und dies bei einer sehr guten Strahlqualität.

Dual-wavelength lasers with excellent spatial and spectral beam properties for Raman spectroscopy and terahertz generation

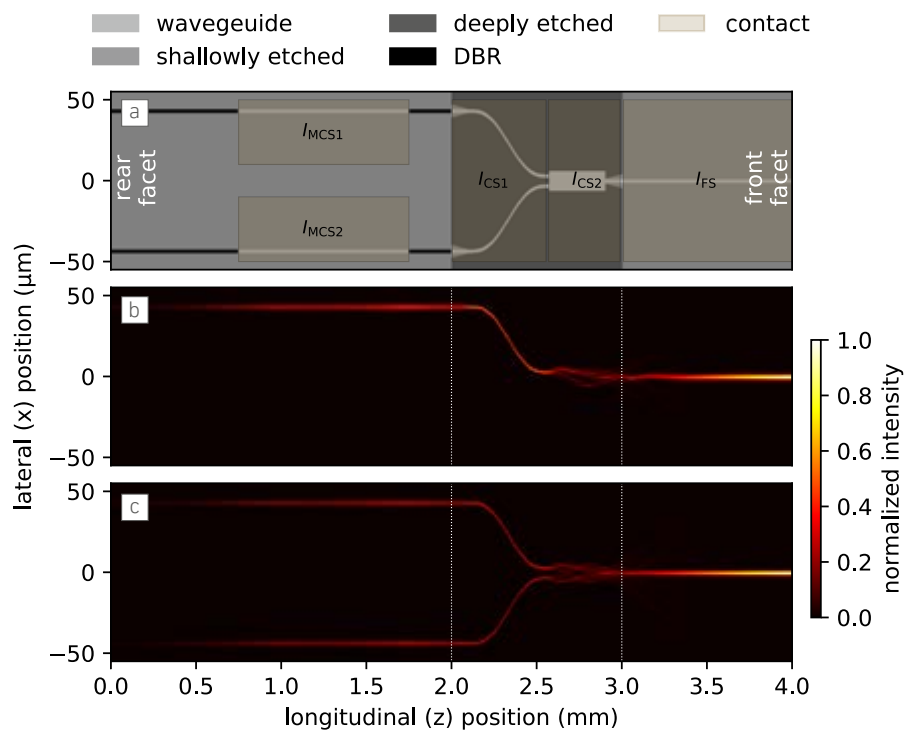


Fig. 1. (a) Schematic top view of an MMI coupler-based dual-wavelength laser. Simulated time averaged intra-cavity intensity distributions of the cases where only the upper (b) or both laser arms (c) are in use.

Coherent light emission of two slightly detuned wavelengths featuring excellent spatial and spectral beam properties is attractive for various applications. These include Raman spectroscopy as well as the generation of terahertz (THz) radiation. The monolithic integration of GaAs-based dual-wavelength diode lasers results in compact, reliable and cost-efficient devices.

These lasers are realized by coupling two laser branches, both equipped with distributed Bragg reflectors (DBR). Here, the emission wavelength of each branch can be chosen to meet the requirements of the specific application. Both branches are combined using waveguide bands and a coupler which ends in a common waveguide acting as semiconductor optical amplifier SOA, see Fig. 1 (a). Subsequently, the amplified light is coupled out at the anti-reflection coated front facet.

The lateral confinement of the optical wave inside the integrated waveguide components is realized by etching parts of the chip surface and choosing appropriate contact layouts as indicated in Fig. 1 (a). In contrast to previous designs relying only on shallowly etched ridge waveguides, the presented lasers additionally possess deeply etched waveguides, enabling tighter bends and the use of multimode-interference (MMI) couplers. The spectral fine-tuning of each laser channel is achieved by micro-heaters placed next to the DBRs.

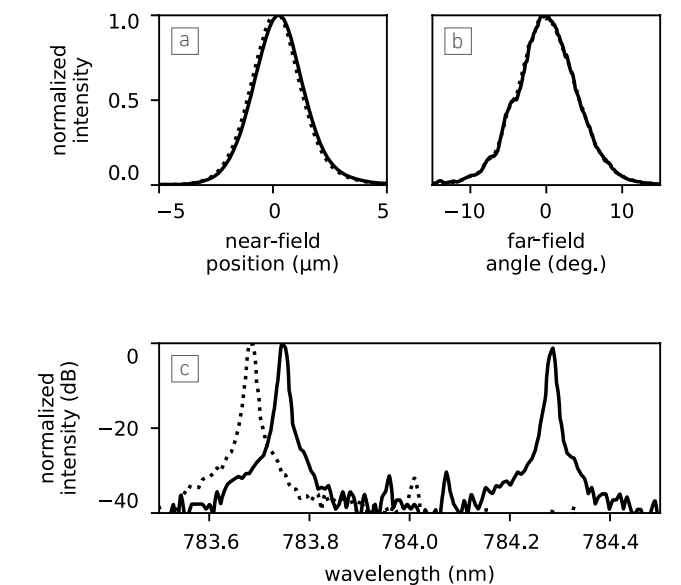
The resulting dual-wavelength lasers enable a reliable and fast switching between the two well-defined emission wavelengths by electrically pumping one of the two laser branches. This alternating dual-wavelength operation is needed for spectroscopic applications, such as differential absorption spectroscopy and shifted excitation Raman difference spectroscopy. The simulated

intra-cavity intensity of this single-wavelength operation is shown in Fig. 1 (b) for the case where only the upper laser branch is operated. The corresponding measured lateral near field, far field and emission spectrum are plotted in Fig. 2 for an output power of approximately 200 mW as dotted lines, showing single lateral and longitudinal mode emission.

The emission of two wavelengths is achieved by operating both laser branches. Fig. 1 (c) shows the intra-cavity intensity distribution of this simultaneous dual-wavelength operation. The corresponding simulated emission spectrum is depicted in Fig. 3 (a), revealing a wavelength difference of $\Delta\lambda = 0.325$ nm between both branches. This leads to a 0.16 THz beating of the emitted power (Fig. 3 (b)), which can be used to generate terahertz radiation via photo mixing. Measurements performed in this mode of operation (solid lines in Fig. 2) lead to an output power of slightly above 200 mW and a nearly diffraction-limited beam and single-longitudinal mode operation for both emission wavelengths.

The presented monolithically integrated dual-wavelength laser design combines an excellent beam quality with very good spectral properties for single-wavelength and two-wavelength operation. Consequently, this device is a suitable source for difference spectroscopy and the generation of beating signals as used to generate THz radiation.

Fig. 2. Measured lateral (a) near field and (b) far field obtained for running only the upper (dotted lines) or both branches simultaneously (solid lines). The corresponding emission spectrum is shown in (c). All shown measurements were obtained by applying 200 mA to the laser branch(es) as well as to the SOA at the front.



Laserquellen, die zwei leicht zueinander verschobene Laserwellenlängen aus einem Chip emittieren, sind für Anwendungen in der Spektroskopie und zum Erzeugen von Terahertz-Strahlung hochinteressant. Dazu werden zwei frequenzstabilisierte Laser nebeneinander realisiert. Ihr Licht wird mittels gekrümmter Wellenleiter und einem Koppler in einen gemeinsamen Wellenleiter geführt und an der Frontfacette emittiert. Das Design kombiniert tief und flach geätzte Rippenwellenleiter, was kompakte, stark gekrümmte Wellenleiter sowie den Einsatz von Multimode-Interferenzkopplern ermöglicht.

Das schnelle Umschalten zwischen zwei exakt definierten Wellenlängen wird in der differentiellen optischen Absorptions- und Raman-Spektroskopie eingesetzt. Die gleichzeitige Emission von Licht zweier Wellenlängen führt zu einer Modulation der optischen Ausgangsleistung – definiert durch den Wellenlängenunterschied. Ein solches Signal kann dazu verwendet werden, um mittels Fotomischer Terahertz-Strahlung zu erzeugen. In beiden Betriebsmodi zeigt der hier vorgestellte Zweiwellenlängen-Diodenlaser exzellente räumliche und spektrale Strahleigenschaften.

Publications

J.-P. Koester, M. Radziunas, A. Zeghuzi, H. Wenzel, A. Knigge, "Simulation and design of a compact GaAs based tunable dual-wavelength diode laser system", *Optical and Quantum Electronics* 51(10), 334, (2019).

J.-P. Koester, H. Wenzel, J. Fricke, O. Brox, A. Zeghuzi, A. Müller, L. S. Theurer, B. Sumpf, A. Knigge, G. Tränkle, "Comparative Study of Monolithically Integrated MMI-Coupler-Based Dual-Wavelength Lasers", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, doi: 10.1109/JSTQE.2021.3084344 (2021).

Fig. 3. Simulated (a) optical spectrum and (b) power time trace obtained by operating both laser branches simultaneously. The abscissa in (b) represents the time after switching on all applied driving currents.

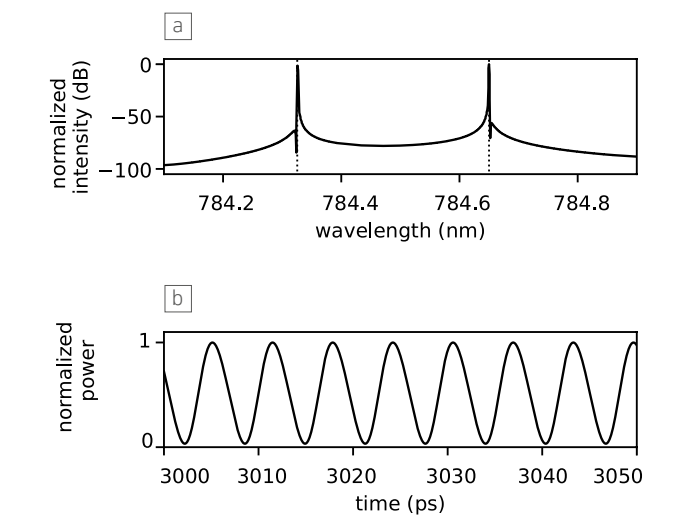




Fig. 1. Assembled micromodule.

For direct material processing, high optical output powers with excellent beam qualities are necessary. Diode lasers are often used for this purpose due to their unbeatable advantages such as efficiency, lifetime and compactness. The Ferdinand-Braun-Institut has succeeded in developing a suitable miniaturized laser beam source with a footprint of only $7.6 \times 5.4 \text{ cm}^2$, offering more than 30 W output power in continuous wave mode at a central wavelength of 977 nm. The high output power has been achieved while maintaining an excellent beam quality factor of $M^2 < 3$ in both beam axes, thus the best available performance in class. It therefore has the potential to replace less efficient and significantly larger diode pumped solid-state laser setups.

Six laser beams emitted by Bragg grating-stabilized tapered diode lasers were combined almost loss free. Each laser delivers reliable output powers in the watt range at high beam qualities. Coupling of 6 single laser emitters was achieved by utilizing the spectral and polarization properties of every single source. Due to the Bragg grating-supported wavelength stabilization, the spectral width of every single laser is narrow and precisely tuneable. Using these features, two wavelength multiplexing

steps were implemented, which combine 3 laser beams into a multispectral output. The individual lasers have a spectral spacing of 5 nm, which requires precisely adjusted spectral filters in order to combine the laser beams. The multiplexed beam is then switched in the direction of polarization by 90° to enable coupling with a second multiplexed beam. The second beam is therefore unaltered in polarization. A customized thin-film polarizer is utilized to enable high coupling rates for the given spectral range of 10 nm.

The complete setup is micro-integrated into an FBH-developed butterfly housing with a footprint as small as 41 cm^2 , shown in Fig. 1. Due to the close vicinity of the single emitters the ideal laser arrangement within the module was calculated using FEM tools to minimize thermal crosstalk effects. As seen in the power characteristics curve in Fig. 2, no mature rollover effects are visible even at high output powers, which supports the laser arrangement and cooling concept. To ensure that the generated optical power does have a possibly high spatial beam quality, every combination step has to be tuned precisely. Each beam is directed such that spatial and angular properties are in highest

Micro-integrated high-power infrared laser source for direct material processing

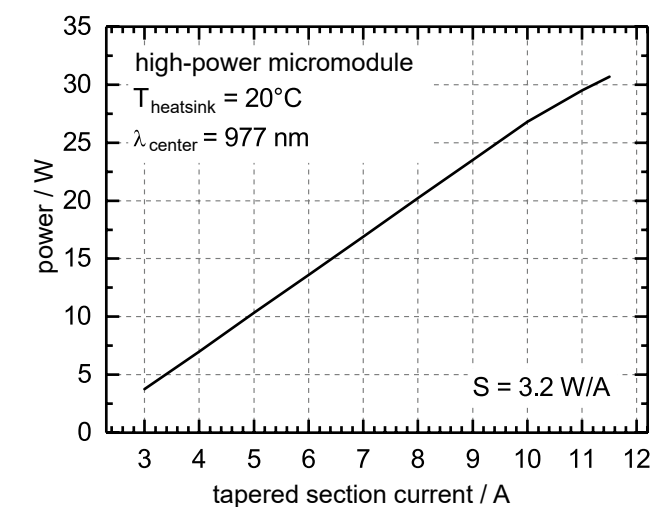


Fig. 2. Exemplary micromodule power characteristics.

overlap with the coupled beam. With the described specifications, a key application of this micromodule is direct material processing. The developed micromodule features excellent output characteristics and a small package size at the same time. Therefore, applications can be addressed that have not been accessible by laser diode-based devices so far. To the best of our knowledge, no comparable micromodule with the given optical output has been presented. The module concept can furthermore be adapted to different wavelengths within in the near-infrared spectral area.

The presented results were achieved within the project "Micro module for cw to femtosecond machining" (E! 11440 MiFeM) supported by the Eurostars™ funding program.

Publication

P. Hildenstein, A. Sahn, D. Feise, D. Jedrzejczyk, K. Paschke, G. Tränkle, "High power, high beam quality miniaturized diode laser module for direct material processing at 980 nm", Proceedings Volume 11668, High-Power Diode Laser Technology XIX, 1166804 (2021).

Laserstrahlung mit hohen optischen Leistungen bei gleichzeitig hoher Strahlqualität wird für die Materialbearbeitung benötigt. Dafür werden bislang meist Festkörperlaser eingesetzt, die von Diodenlasern gepumpt werden. Am FBH wurde nun ein Mikromodul entwickelt, das bei hoher Strahlqualität $M^2 < 3$ eine Ausgangsleistung von über 30 W erreicht. Dank seiner exzellenten Eigenschaften und der kompakten Baugröße von lediglich $7.6 \times 5.4 \text{ cm}^2$ eignet sich dieses Lasermodul auch für Anwendungen, die bisher mit direkt emittierenden Laserquellen nicht zugänglich waren. Das FBH-Konzept nutzt Trapezdiodenlaser, die durch ein Bragg-Gitter frequenzstabilisiert sind. Dank der definierten spektralen Eigenschaften dieser Laser lässt sich die Strahlung mehrerer Emitter mithilfe von wellenlängensensitiven optischen Filtern koppeln. Zusätzlich werden die Polarisations-eigenschaften der Laser für eine Kopplung genutzt.

Small-sized 626 nm laser for miniaturizing quantum optical experiments

Quantum information science and, in particular, quantum computing are believed to revolutionize many everyday applications. One example is the secure data transfer of financial institutions. However, current experimental setups are bulky and take up significant laboratory space. Miniaturizing existing experiments is therefore mandatory before widespread application can begin. By extending its mounting technology platform to sub-zero temperature assembly, the FBH succeeded in shrinking an important supplementary equipment to achieve this goal.

A common ingredient to quantum information experiments are Bose-Einstein condensates of ultra-cold beryllium ions (${}^9\text{Be}^+$). Lasers are applied to cool down these ions to the a few micro-Kelvins. The necessary laser radiation has a wavelength of approximately 313 nm. So far, this wavelength can only be generated using complex laser systems covering a footprint of about one square meter. Direct frequency doubling of laser light at 626 nm would significantly reduce this size, yet the wavelength of 626 nm is not readily available.

To close this technological gap, the FBH has developed laser diodes with narrow linewidths ideally suited for that application [1]. However, the laser itself only emits about 20 mW at the desired wavelength, which is an order of magnitude below the power needed for laser cooling system for ${}^9\text{Be}^+$. Therefore, special

amplifiers were developed that allow boosting the output power to the required level. The amplifiers, on the other hand, feature a poor thermal performance due to the physical limit of finite electron barriers [2]. This requires aggressive cooling and therefore the laser chip as well as the amplifier were mounted onto an inlet to form a master-oscillator power-amplifier (MOPA). The inlet is placed into a sealed package, which is filled with an inert gas. This allows operation at sub-zero temperatures without the risk of condensation or icing and protects the inlet within from environmental influences (see Fig. 1).

Two challenges had to be overcome: The first was mounting the micro-optics onto the inlet under inert gas conditions. This was met by purging the package with dry nitrogen during the active coupling of the MOPA. The second challenge was getting a suitable miniaturized optical isolator for the wavelength of 626 nm. This was met by obtaining prototypes of miniaturized optical isolators based on CdMnTe, which were adjusted and fixed to allow operation at this wavelength.

The miniaturized MOPA was assembled at an inlet temperature of $-5\text{ }^\circ\text{C}$ and a case temperature of $+15\text{ }^\circ\text{C}$ and it emitted up to 150 mW (see Fig. 3). Subsequently, the device was sealed and cooled further so that 250 mW could be achieved at $-15\text{ }^\circ\text{C}$. The laser line was fixed at 626 nm using a grating heater at the

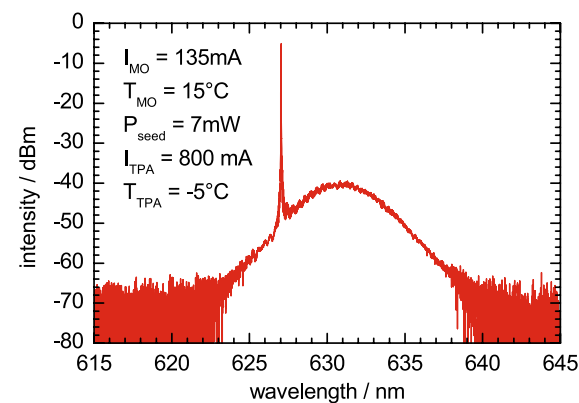


Fig. 2. Emission spectrum of a master-oscillator power-amplifier showing a laser line at 626 nm and a gain peak at 631 nm at an optical power of 200 mW.

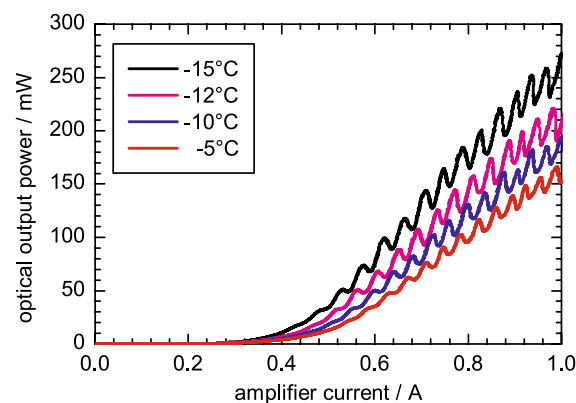


Fig. 3 Optical output power of a miniaturized master-oscillator power-amplifier as a function of amplifier current for various inlet temperatures.

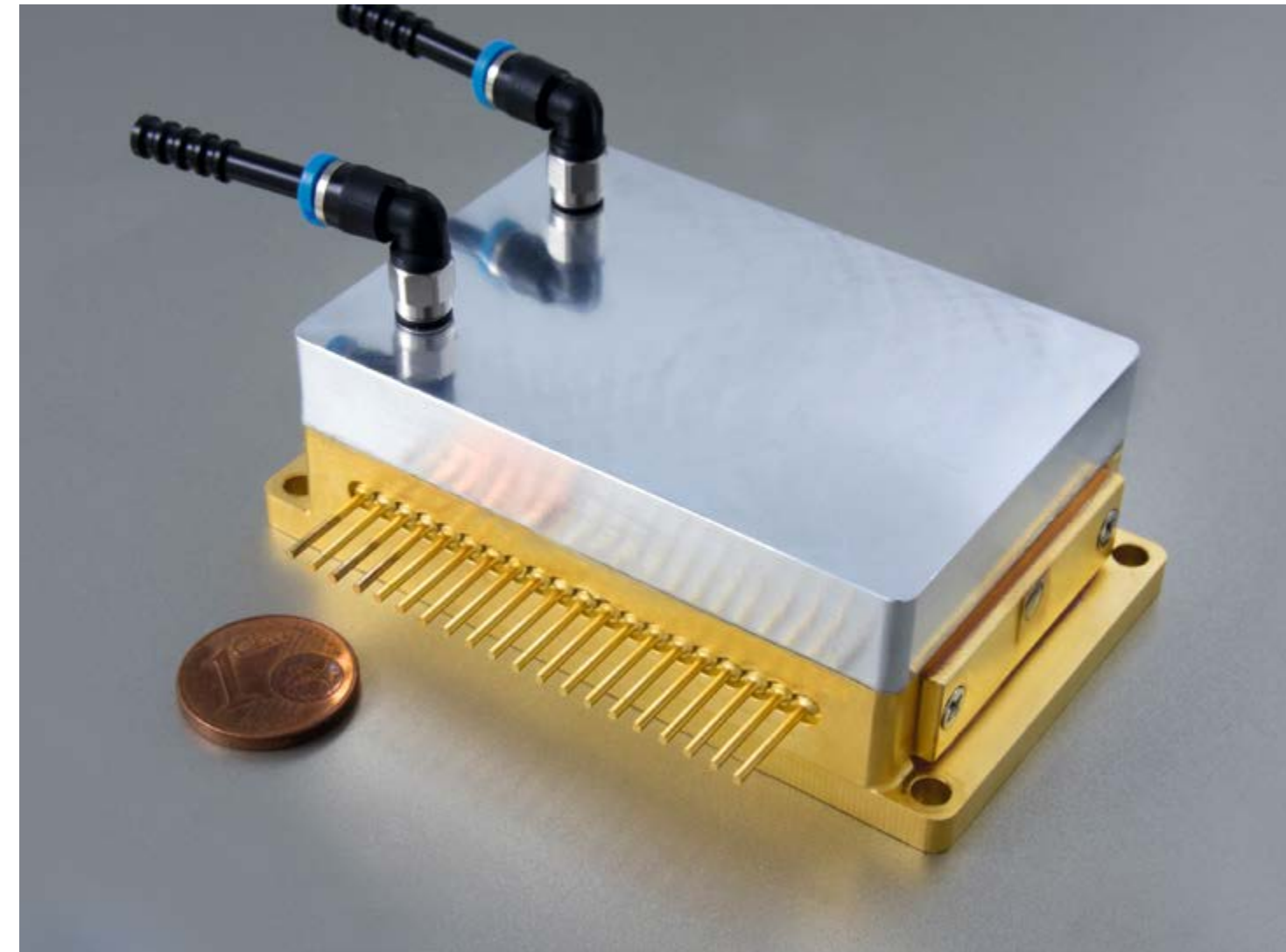


Fig. 1. Sealed MOPA module with gas pipes for inert gas purging.

master oscillator [3]. Thus, a prototype laser source was realized that has the potential to miniaturize future quantum information experiments involving ultra-cold beryllium ions. We like to thank Toptica Photonics AG for providing prototypes of miniaturized optical isolators.

Das FBH hat seine Technologieplattform für die präzise Mikro-montage erfolgreich erweitert. Damit ist jetzt auch die aktive Montage bei Temperaturen um den Gefrierpunkt möglich. Bei einer Modulinnentemperatur von $-15\text{ }^\circ\text{C}$ wurde eine miniaturisierte Laserquelle entwickelt, die bei 626 nm Wellenlänge über 200 mW Ausgangsleistung emittiert. Diese Laserquelle von der Größe eine Streichholzschachtel basiert auf einer Master-Oszillator-Power-Amplifier-Konfiguration und wird bei der Laserkühlung von ultrakalten Beryllium (${}^9\text{Be}^+$)-Ionen eingesetzt werden. Ultrakalte ${}^9\text{Be}^+$ -Ionen werden in vielen quantenoptischen Experimenten verwendet und können beispielsweise für quantenoptische Computer genutzt werden. Derzeit ist der experimentelle Aufwand noch enorm und die dafür notwendigen Aufbauten füllen ganze Labore. Eine Miniaturisierung erlaubt kleinere Konfigurationen solcher quantenoptischer Computer, die unter anderem für die Datensicherheit in der Finanzwelt interessant werden können.

Publications

[1] G. Blume, O. Nedow, D. Feise, J. Pohl, K. Paschke, "Monolithic 626 nm single-mode AlGaInP DBR diode laser," Optics Express 21 (18), 21677-21684 (2013).

[2] G. Blume, A. Koyucuoglu, M. Drees, J. Pohl, D. Feise, A. Sahm, K. Paschke, "Master-Oscillator Power-Amplifier system emitting at 626 nm: Increasing the laser power for future ${}^9\text{Be}^+$ cooling applications", SIOE Conference Cardiff (2021).

[3] G. Blume, M. Drees, J. Pohl, D. Feise, A. Sahm, K. Paschke, "Miniaturized Master-Oscillator Power-Amplifier emitting at 626 nm", CLEO Europe (2021).

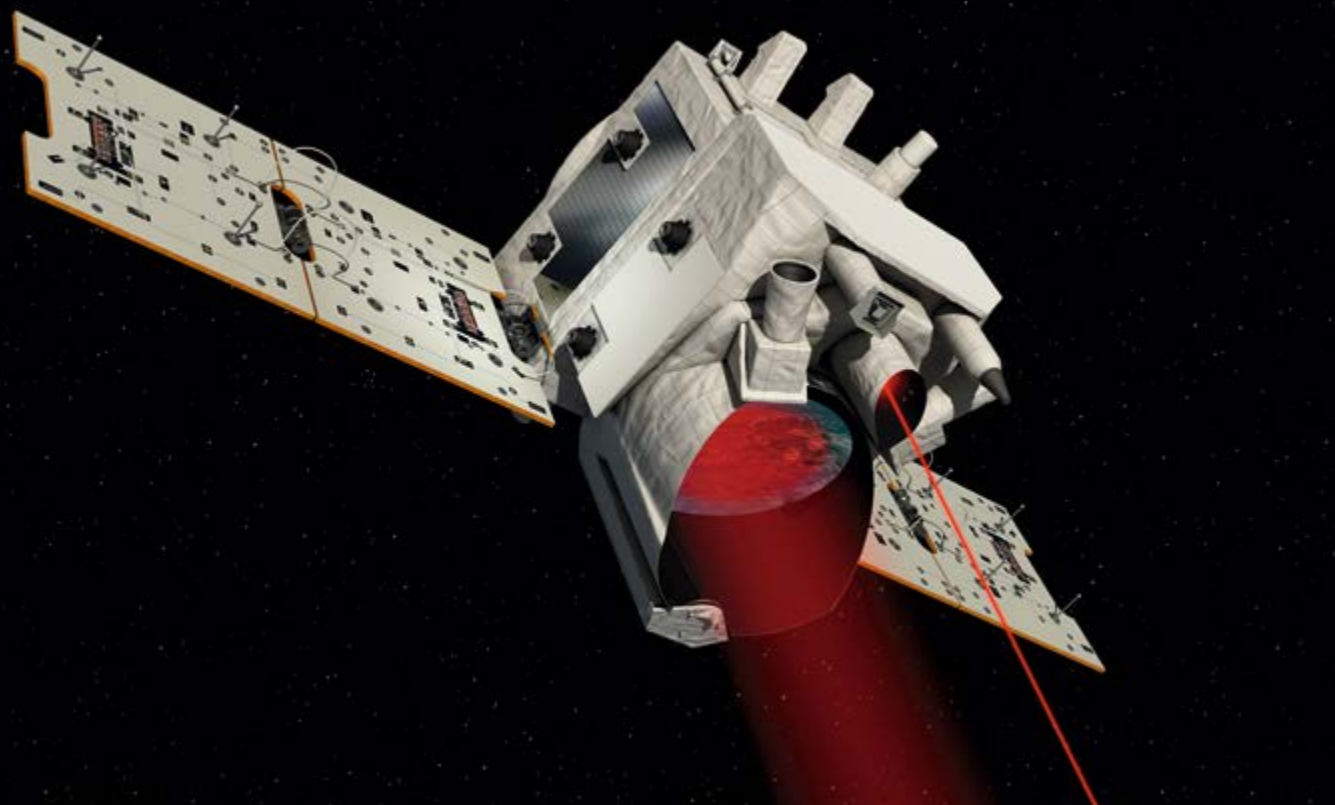


Fig. 1. The Franco-German climate satellite MERLIN is to detect and monitor the greenhouse gas methane in the atmosphere during its three-year mission.

Laser diode benches for the climate satellite MERLIN

Investigations on global warming caused by the emission of greenhouse gases are of vital interest to understand the impact of human civilization on the earth's biosphere. Measuring the concentration of such gases in the atmosphere is most important for quantitatively analyzing their correlation to the increase of global temperature observed during the past decades. Those analyses support the prediction of future climate scenarios dependent on control and reduction of greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide, methane and nitrous dioxide. Methane (CH_4) is still much less present in the atmosphere (2 ppm) than carbon dioxide (400 ppm), but it heats up the atmosphere 25 times more efficiently. Therefore, mitigating CH_4 would give considerable benefits regarding allowable carbon emission to reach the 1.5 °C target of global temperature increase.

The French-German project "Methane Remote Sensing Lidar Mission" MERLIN was launched as part of "Agenda 2020". Its mission is to investigate the atmospheric CH_4 distribution from a satellite (Fig. 1) by scanning the globe on a dusk-down low earth orbit. The opto-mechanical part of the Merlin LiDAR was developed in an extended feasibility study by the Fraunhofer ILT using pump lasers developed and supplied by the Ferdinand-Braun-Institut. The heart of the MERLIN payload consists of an optical parametric oscillator emitting 20 Hz double pulses at

two closely spaced wavelengths, one of them is absorbed by CH_4 . Both signals are detected after reflection from the earth's surface. Their difference subtracts the atmospheric loss from the absorption signal, which is proportional to the CH_4 concentration within the path between satellite and ground. The oscillator is seeded at 1645 nm by a DBR laser diode and pumped at 1064 nm from a Q-switched Nd:YAG laser, which is pumped at 808 nm with pulse power exceeding 125 W.

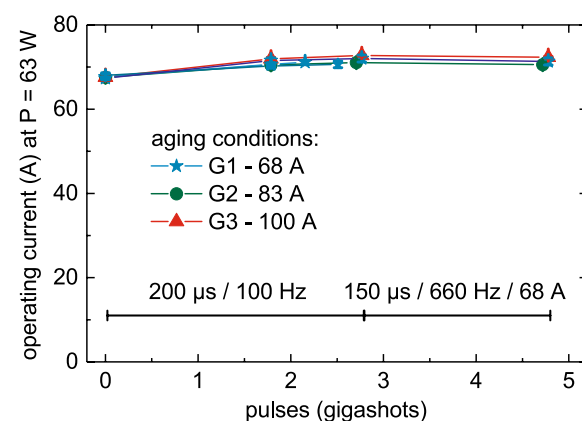


Fig. 2. Trace of operating current during life test up to 100 A, 4.8 billion shots. No single failure was observed.

Based on our space-qualified in-orbit proven technology platform, 808 nm pump laser diode benches (LDB, see Fig. 3) were assembled, tested and delivered as qualification and flight models for deployment in the MERLIN satellite. Space-qualified materials, processes and screening procedures were applied to assure reproducibility of FBH's previously space-qualified laser products. Those include testing against space irradiation, thermal and mechanical stress and life testing. Each laser bench consists of a half-bar each with 16 emitters, pulsed at 63 W peak power and 150 – 200 μs pulse length. An optical lens was attached to each LDB to collimate the light of two half-bars into one optical fiber with beam-forming optics, using space-qualified processes. In-house life tests of 20 samples indicated no single failure of any emitter after 4.8 billion shots per LDB (Fig. 2). The tests were performed under enhanced stress conditions up to 100 W optical peak power for each half-bar. Evaluation of the test result, considering hot redundancy of all single emitters, allows to estimate the reliability. The residual risk remains at only 0.01 % failure probability after 5 years of operation. The estimate was based on time acceleration by enhanced stress during life test and single emitter statistics with high confidence level (99 %). Operational endurance over the full mission load was confirmed by additional life test campaigns by an independent institute of the European Space Agency, the ESA technology center (ESTEC) in the Netherlands.

For the "MERLIN" satellite project, the Fraunhofer ILT is developing the laser source under contract to Airbus DS GmbH. The work presented here performed by the FBH supports this contract on behalf of the Federal Ministry of Economics and Energy BMWi under the funding reference 50EP1601.

Im Rahmen einer deutsch-französischen Kooperation soll im Projekt MERLIN die Konzentration und Verteilung des Treibhausgases Methan in der Erdatmosphäre gemessen werden. Hierzu wird ein Laser-Radar auf einem Satelliten eingesetzt. Ein Bestandteil dieses Messgeräts sind Hochleistungs-Diodenlaser, die als Pumpquelle eines Festkörperlasers eingesetzt wird. Diese Pumplaser wurden am Ferdinand-Braun-Institut entwickelt, gefertigt und für Weltraumanwendungen qualifiziert. Die Lasermodule bestehen aus Halbbaren mit je 16 Emittlern und einer Kollimationsoptik. Sie werden mit 150 – 200 μs kurzen Pulsen bei 808 nm Wellenlänge und 63 W Pulsleistung betrieben. Um die Zuverlässigkeit zu bewerten, wurde mit 20 Lasermodulen ein Belastungstest bei überhöhter Leistung von bis zu 100 W über 4,8 Milliarden Pulse durchgeführt. Dabei fiel kein einziger der insgesamt 320 Emittler aus. Somit konnte eine hohe Zuverlässigkeit von 99,99 % über fünf Jahre Betriebszeit abgeschätzt werden. Zusätzliche Qualifikationstests am Technologiezentrum der Europäischen Weltraumagentur bestätigten die herausragende Zuverlässigkeit der Laser.

Fig. 3. FBH's space-qualified laser diode bench for integration into the satellite. Each LDB delivers 63 W pulsed pump power from a laser half-bar.



Publications

K. Häusler, R. Staske, A. Maaßdorf, P. Ressel, C. Stölmacker, G. Tränkle, P. Crump, "Laser Diodes as Reliable Pump Source for Space-Borne Methane Remote Sensing Lidar System", Conference on Lasers and Electro-Optics USA (2021).

K. Häusler, R. Staske, A. Maaßdorf, P. Ressel, C. Stölmacker, G. Tränkle, P. Crump, "Pulsed Diode Laser Minibars for Pumping Space-Borne Solid-State Lasers", IEEE Photonics Technology Letters, accepted (2021).

High-brightness broad-area diode lasers with enhanced self-aligned lateral structure for material processing applications

High-power broad-area diode lasers (BALs) are used in a wide variety of industrial, space, and medical applications. The main reason for this is their high power-conversion efficiency, which is superior to all other light sources. Material processing applications are one of the largest markets for these devices, in which they are either used directly or as pump sources for solid-state (disk and fiber) lasers. To reduce operation costs in these applications, high efficiency is not sufficient by itself; BALs must also exhibit high brightness, i.e. high beam quality at high output power. BALs typically have very high beam quality along the vertical axis, but their brightness is limited by their multimode profiles along the lateral axis, where a combination of thermal and non-thermal mechanisms results in reduced lateral beam quality. Thus, enhancing the conversion efficiency (η_E) and lateral brightness (B_{lat}) are among the main topics of interest in FBH's ongoing research and development efforts on high-power BALs.

One important technique to enhance BAL performance is the lateral confinement of electric current and charge carriers under

the central stripe. This technique limits the detrimental effects of non-thermal mechanisms such as lateral current spreading and carrier accumulation (LCA) at stripe edges. Various confinement techniques have been implemented at FBH and elsewhere, but most techniques result in a trade-off, where certain performance aspects are improved while others are compromised. Therefore, as part of its ongoing partnership with TRUMPF, FBH has developed an enhanced variant of the self-aligned lateral structure, an established confinement technique which has the potential to simultaneously increase η_E and B_{lat} . This enhanced self-aligned structure (eSAS), shown in Fig. 1, uses two-step epitaxial growth with an intermediate etching step to introduce a current block in device edges, thereby confining current to the center. The current block is realized by growing n-doped layers within the p-side of the diode laser, thus creating a reverse-biased pn-junction which blocks current. These blocking layers are then selectively etched to create a current aperture in the center. The eSAS is implemented within an extreme triple asymmetric (ETAS) vertical structure with thin p-side cladding and waveguide layers. This allows

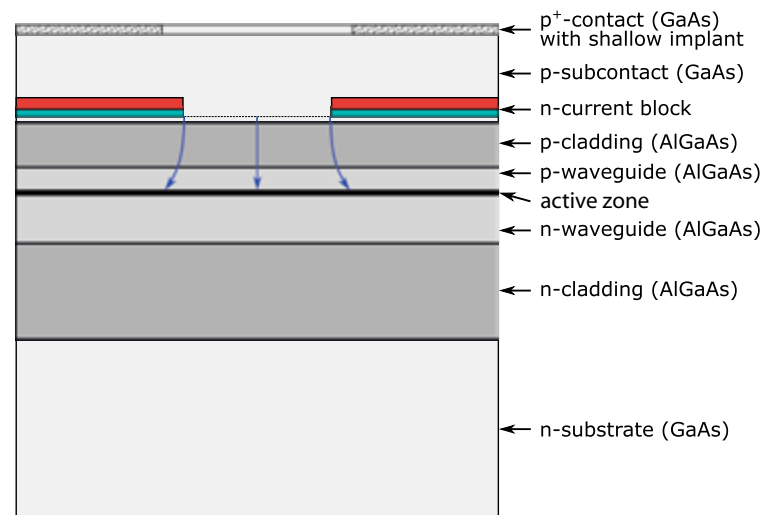


Fig. 1. Schematic diagram of a broad-area diode laser with the enhanced self-aligned lateral structure (eSAS), showing the n-doped current block within the extreme-triple-asymmetric (ETAS) vertical structure.

Fig. 2. Voltage, power and conversion efficiency as functions of current for reference and eSAS single-emitters with 90 μm stripe width and 4 mm resonator length, measured under CW conditions at 25 $^{\circ}\text{C}$.

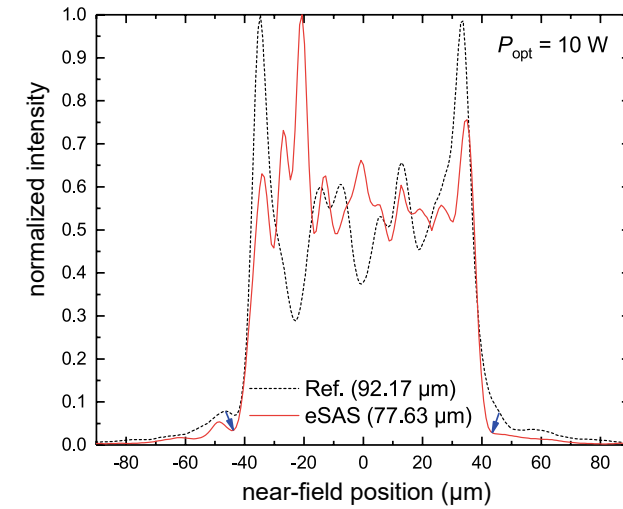
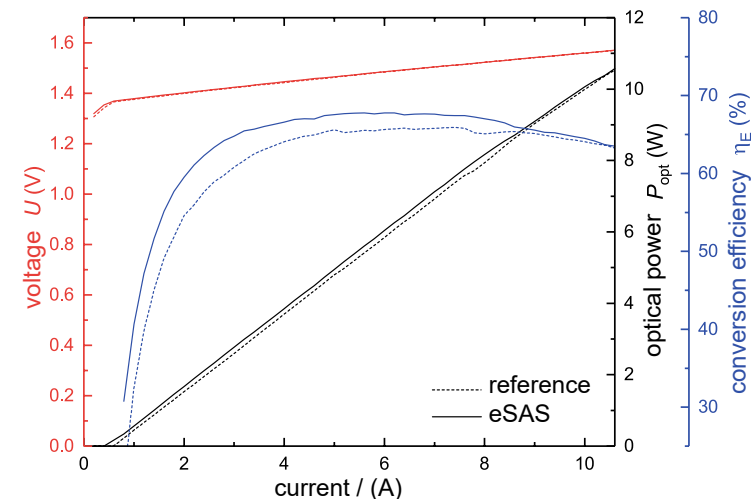


Fig. 3. Normalized intensity as a function of near-field position for reference and eSAS single-emitters (dimensions and measurement as in Fig. 2), showing intensity suppression at stripe edges in eSAS.

growing the blocking layers close to the active zone without added process complexity.

eSAS single-emitters (SEs) with 90 μm stripe width and 4 mm resonator length, tested under continuous-wave (CW) conditions at 25 $^{\circ}\text{C}$, demonstrate clear advantages over gain-guided reference devices with the same dimensions. In terms of power-current-voltage characteristics (Fig. 2), the threshold current is reduced by 18% and η_E is increased by up to 2 percentage points. The near-field width is reduced by 13.5% due to intensity suppression at the stripe edges (Fig. 3), while the far-field angle remains almost constant, resulting in an 18% increase of B_{lat} on average. Additionally, high polarization purity is maintained in eSAS SEs, indicating that no mechanical stress is induced within the structure during the etching and regrowth steps. The best eSAS SE to date exhibits a peak η_E of 68.1% and a B_{lat} of 3.14 W/(mm-mrad) at an operating power of 10 W, and 99.5% polarization purity. The same performance trends have also been demonstrated from SEs with varying stripe widths, and from 1 cm-wide bars with 48 emitters (90 μm stripe width), measured under quasi-CW conditions up to 0.5 kW.



Hochleistungs-Breitstreifenlaser (BALs) werden in den verschiedensten Anwendungen eingesetzt und sind in der Materialbearbeitung besonders wichtig. Um die Betriebskosten zu senken, müssen diese Diodenlaser besonders effizient sein (= hohe η_E) und eine exzellente laterale Brillanz (B_{lat}) bei hohen Ausgangsleistungen bieten. Das lässt sich erreichen, indem Strom- und Ladungsträger zentral begrenzt werden. Dadurch werden die Nachteile von lateraler Stromausbreitung und Ladungsträgerakkumulation minimiert. In Zusammenarbeit mit TRUMPF hat das FBH eine verbesserte selbstausrichtende laterale Struktur (eSAS) entwickelt, die gleichzeitig η_E und B_{lat} erhöhen kann. Bei dieser Struktur wird ein Stromblock seitlich in die p-Seite einer extrem dreifach-asymmetrischen (ETAS) Vertikalstruktur integriert. Verglichen mit Referenz-BALs zeigen eSAS-BALs einen niedrigeren Schwellenstrom, ein höheres η_E (bis 68,1%), eine vergleichbare Polarisationsreinheit, eine schmalere Nahfeldbreite und einen ähnlichen Fernfeldwinkel – und damit eine höhere B_{lat} bis 3,14 W/(mm-mrad).

Publications

M. Elattar, O. Brox, P. Della Casa, A. Maaßdorf, D. Martin, H. Wenzel, A. Knigge, P. Crump, "High-brightness broad-area diode lasers with enhanced self-aligned lateral structure", *Semicond. Sci. Technol.* 35, 095011 (2020).

M. Elattar, O. Brox, P. Della Casa, A. Maaßdorf, D. Martin, H. Wenzel, A. Knigge, P. Crump, "Enhanced self-aligned structure for improved lateral brightness in 940 nm high-power broad-area diode lasers", *Proc. SPIE* 11705, 117050N (2021).

Advanced diagnosis of limits to high-power diode lasers: challenges from interfaces

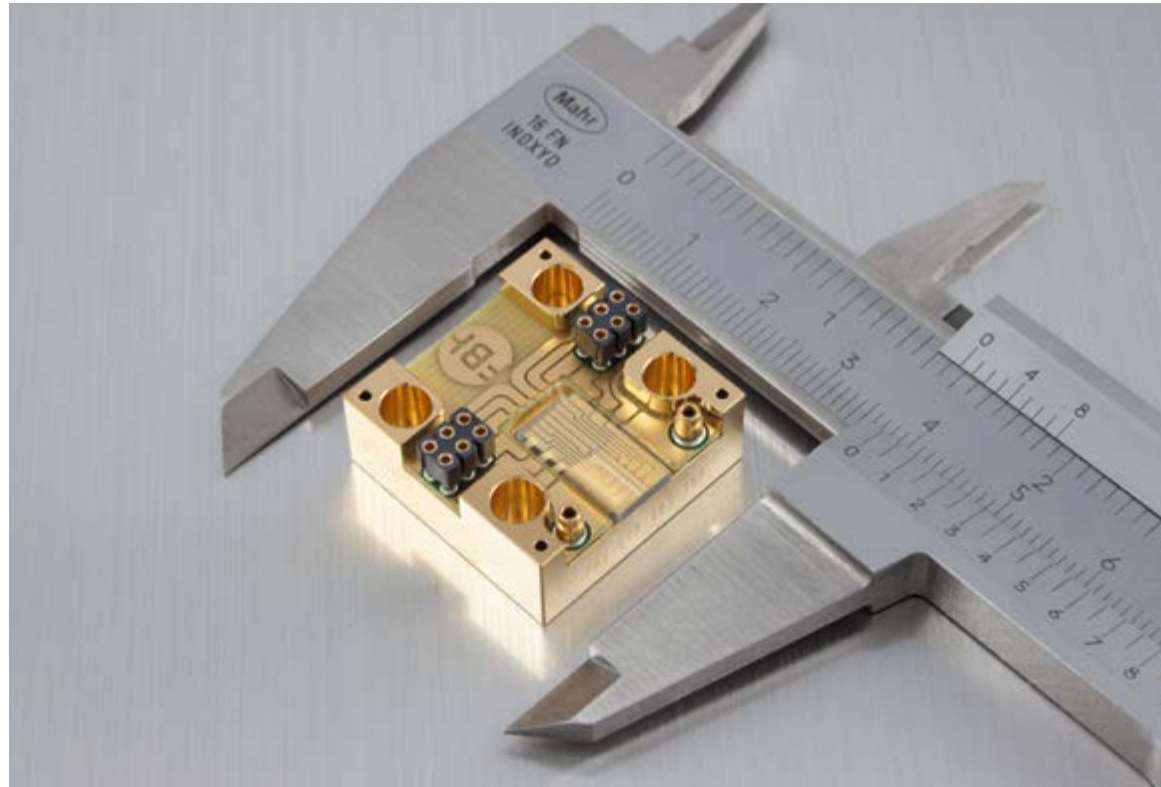


Fig. 1. Packaging used to test current profile along the resonator in custom lasers with segmented contacts.

Continuous improvement is needed in power and conversion efficiency of high-power diode lasers to support industry. In 2020, FBH scientists reported significant progress in understanding these limits, summarized at the European Semiconductor Laser Workshop [1].

First, output power must increase to enable both lower cost in €/W and new applications. However, as current increases, power saturates and the effects behind this saturation must be better understood and addressed. When the resonator length (L) is increased for a fixed design, the devices are better cooled (~1/L)

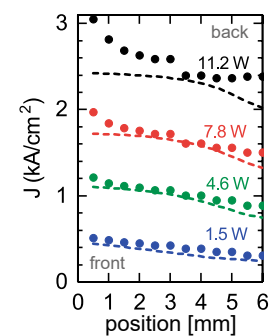


Fig. 2. Measured (points) and simulated (lines) longitudinal current density profile at various output powers for a diode laser with L = 6 mm with $R_f = 0.8\%$.

but power increases only marginally. High L leads to non-uniformity in photon density along the resonator. The resulting high stimulated recombination rate (carrier loss) at the front facet and low rate at the back leads to non-uniform carrier density and degraded power, but the effect is too small to reproduce measurements. In new studies published in 2020 [2], the current profile along the resonator was measured using a customized device (Fig. 1) with segmented contacts and compared to simulation (Fig. 2). Current profile matches expectation for L = 3 mm. In contrast, for devices with L = 6 mm, far higher (1.25 x) current and hence carrier loss occurs near the front facet than predicted. The higher current at the front persists even for devices with high (20%) front facet reflectivity that have far more uniform photon density, which implies the presence of other loss mechanisms near the front facet besides spatial hole burning. The work was in collaboration with Lawrence Livermore National Labs (LLNL) and Freedom Photonics in the USA.

Second, conversion efficiency must also increase, and lower electrical (series) resistance is needed. In earlier studies, FBH

scientists showed that 30 – 50 % of the electrical resistance arises in the quantum well. New theoretical studies were presented in 2020, clarifying the source of this resistance [3], which is related to capture-escape processes at the quantum well. High power requires strong pumping of the lowest sub-bands of the quantum well, which feed the stimulated emission. These confined sub-bands do not have a direct connection to the device contacts. Thus, the injected charge carriers must subsequently be captured into these sub-bands. When the capture time is > 0, capture requires a distinct difference between the bulk (free) and sub-band (bound) Fermi levels, which appears as an excess voltage at the contacts and is the source for the excess resistance above that of the bulk layers. Deeper wells have larger Fermi-level differences and hence higher resistance. A schematic depiction of the band profile is shown in Fig. 3 to illustrate the process. When a capture time of 1 ps is assumed, an excess resistance of 1...30 mΩ (30 % of the total) depending on well depth is obtained, in good agreement with experiment (Fig. 4).

Overall, new research in 2020 at the FBH showed that anomalously high current losses near the front facet limit peak power and that the electrical resistance due to finite capture rates into the quantum well limit electrical resistance and hence conversion efficiency. This new understanding will help in the development of higher performance diode lasers. The collaboration with LLNL was supported in part by U.S. Department of Energy Contract No. DE-AC52-07NA27344 and LLNL Directed Research and Development Contract No. 19-FS-002.

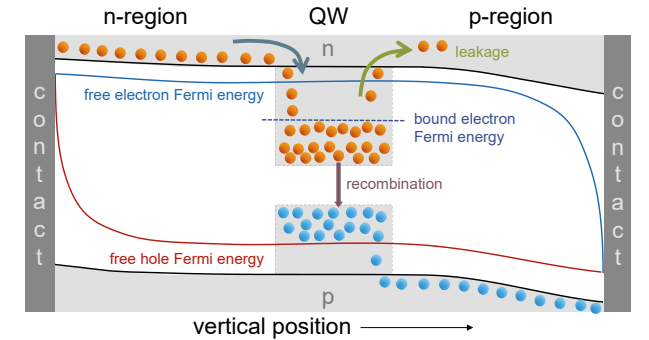


Fig. 3. Schematic band diagram of 1D laser model.

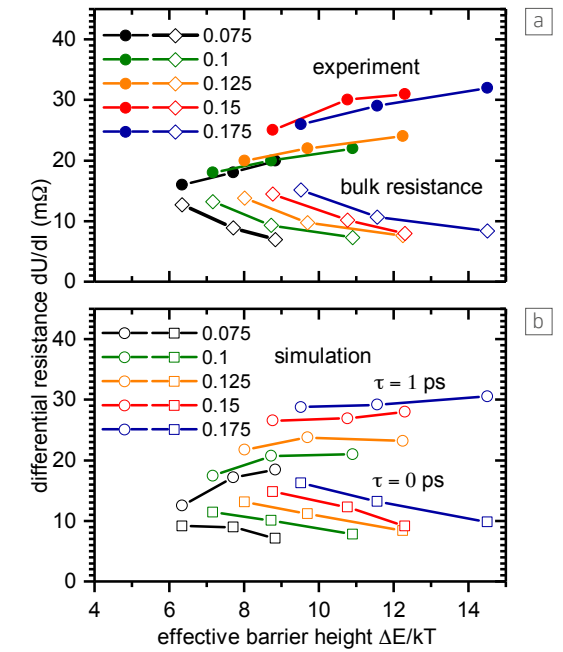


Fig. 4. Measured and simulated differential resistance of structures with different Al content (legend) versus effective barrier height (difference between the lowest energy state in the QW and the conduction band edge in the waveguide at a fixed temperature). (a) Closed circle: measured, open diamonds: bulk layer resistance. (b) Open circles: simulation with $\tau = 1$ ps (slow capture), open square: simulation with $\tau = 0$ ps (fast capture).

Industrielle Lasersysteme sind stark nachgefragt und werden immer leistungsfähiger. Daran haben Diodenlaser mit immer höherer Ausgangsleistung und Brillanz einen wesentlichen Anteil. Um limitierende Faktoren von optischer Leistung und Wirkungsgrad zu identifizieren, haben Wissenschaftler diese detailliert untersucht. So sind Diodenlaser mit längeren Resonatoren besser gekühlt, liefern jedoch nur begrenzte optische Ausgangsleistungen. Als Ursache dafür ermittelten das FBH und seine Partner exzessiven Stromfluss nahe der Ausgangsfacetten. Was den Wirkungsgrad betrifft, limitiert der Serienwiderstand die Effizienz von Diodenlasern. Die Wissenschaftler am FBH haben nachgewiesen, dass bei modernen GaAs-basierten Lasern der Widerstand am Quantentrog ein begrenzender Faktor ist. Ein neu entwickeltes Simulationstool errechnet den Einfluss der Übergangszeiten von Elektronen in den und aus dem Quantentrog, wodurch sich die Messwerte gut reproduzieren lassen. Eine mittlere Einfangzeit von 1 ps ist für 30–50 % des Widerstands (10 mΩ) verantwortlich und limitiert damit den Wirkungsgrad erheblich. Das tiefere Verständnis für diese begrenzenden Faktoren soll künftig noch effizientere und leistungsstärkere Diodenlaser ermöglichen.

Publications

- [1] P. Crump, G. Tränkle, "Material interfaces as performance-limiting factors in high power GaAs-based diode lasers", European Semiconductor Laser Workshop (ESLW 2020), pp. 12-13 (2020).
- [2] S. Arslan, R.B. Swertfeger, J. Fricke, A. Ginolas, C. Stölmacker, H. Wenzel, P.A. Crump, S.K. Patra, R.J. Deri, M.C. Boisselle, D.L. Pope, P.O. Leisher, "Non-uniform longitudinal current density induced power saturation in GaAs-based high power diode lasers", Appl. Phys. Lett., vol. 117, no. 20, pp. 203506 (2020).
- [3] A. Boni, H. J. Wünsche, H. Wenzel, P. Crump, "Impact of the capture time on the series resistance of quantum-well diode lasers.", Semicond. Sci. Technol., vol. 35, no. 08, pp. 085032, (2020).

Compact diode laser-based dual-wavelength light source at 532 nm for shifted excitation Raman difference spectroscopy

Raman spectroscopy enables a specific, non-invasive target analysis at the molecular level. To increase Raman intensities using the $1/\lambda^4$ dependence of the Raman scattering cross section and potential resonance effects, laser light sources with emission wavelengths at 532 nm are requested. Even at increased Raman signals, it can still be a significant challenge to measure real-world samples under in situ conditions. Signal disturbances such as fluorescence or ambient light can mask the Raman signals of the target under study.

Shifted excitation Raman difference spectroscopy (SERDS) has been demonstrated to overcome such limitations. For this technique, Raman spectra are measured at two slightly shifted excitation wavelengths. Subsequent subtraction of both spectra then separates the Raman signals that follow the applied wavelength shift from spectrally constant background distur-

bances. Ideal light sources for SERDS should therefore provide alternating, dual-wavelength laser emission with spectral widths and shifts corresponding to the signal bandwidths of the target (e.g., $\leq 20 \text{ cm}^{-1}$ for solid, liquid, and biological samples). Since efficient direct green light-emitting diode lasers do not yet fulfill all these spectral requirements, second harmonic generation (SHG) of near-infrared Y-branch dual-wavelength diode lasers, as previously presented by FBH, is still the method of choice.

Accordingly, a 532 nm dual-wavelength light source based on nonlinear frequency conversion of a specifically newly developed 1064 nm Y-branch distributed Bragg reflector diode laser was demonstrated for the first time [1]. For Y-branch lasers manufactured at FBH and shown in Fig. 1, two individually operated laser cavities are formed between custom DBR gratings

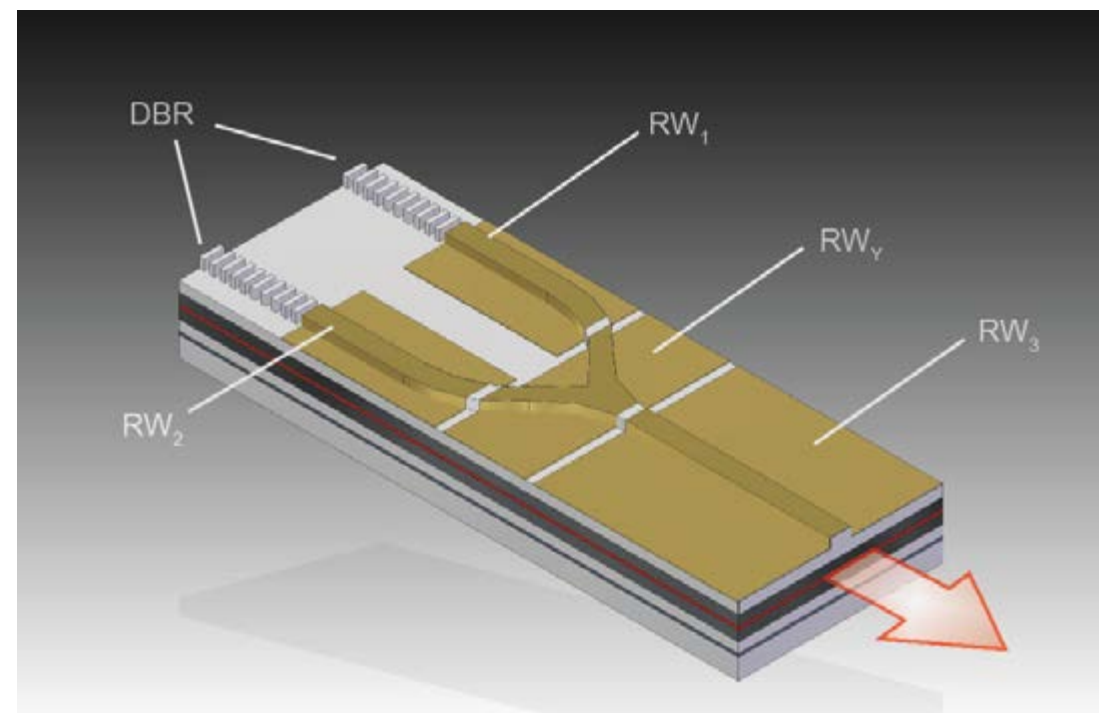


Fig. 1. Illustration of a dual-wavelength diode laser.

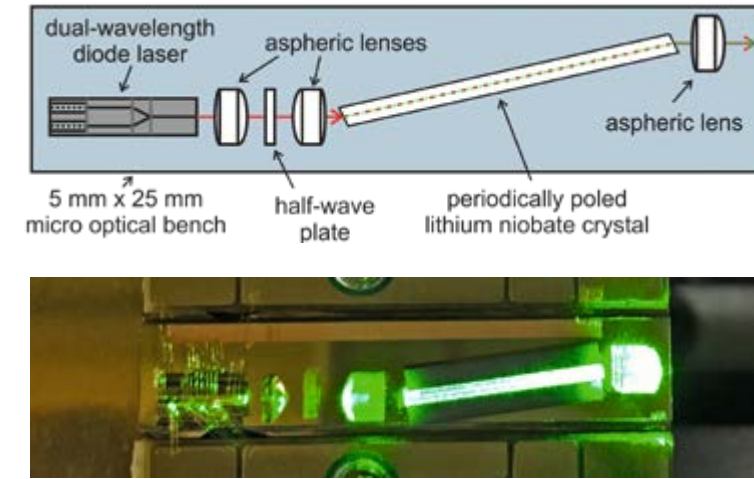


Fig. 2. Optical concept (top) and developed dual-wavelength light source at 532 nm in operation (bottom).

for intrinsic wavelength stabilization at the targeted wavelengths and a common front facet for single-spot excitation in the application. Resistors implemented above each grating allow to apply additional currents that enable adjusting a defined wavelength by Joule heating.

For dual-wavelength, single-pass frequency conversion at 532 nm, laser emission of a Y-branch diode laser was coupled into a customized periodically poled lithium-niobate waveguide crystal with superimposed poling periods using micro-optical lenses (Fig. 2). A half-wave plate was implemented to adjust the polarization for efficient phase matching. This single-pass configuration was carried out on a micro-optical bench with a footprint of only 5 mm x 25 mm. For handling purposes, that micro-optical bench was mounted on a 25 mm x 25 mm industry-standard conduction-cooled package mount.

At a heat sink temperature of 25 °C, optical output powers exceeding 5.6 mW were obtained at 532.45 nm and 531.85 nm, restricted by the diffraction-limited output power available for waveguide coupling into the nonlinear crystal. Fig. 3 shows the two single emission spectra obtained under phase-matching condition for each branch. The latter was obtained by adjusting the fundamental emission wavelengths using the grating resistors. With laser emission widths of 0.01 nm (0.35 cm^{-1}) at full width at half maximum and a spectral distance of 0.6 nm (20 cm^{-1}) between both peak wavelengths the developed light source is ideally suited for Raman spectroscopy and SERDS.

The work was funded by the Federal Ministry of Education and Research in the project Exasens under grant number 13N13858.

Publication

[1] A. Müller, B. Sumpf, "Compact diode laser based light source with alternating dual-wavelength emission at 532 nm", Appl. Phys. B, vol. 126, no. 8, p. 126:128 (2020).

Mithilfe der Raman-Spektroskopie lassen sich Stoffe auf molekularer Ebene spezifisch und nicht-invasiv nachweisen. Um die schwachen Raman-Signale von deutlich stärkeren Störeinflüssen wie etwa Fluoreszenz oder Umgebungslicht zu trennen, wird die Shifted Excitation Raman Differenz Spektroskopie (SERDS) eingesetzt. Dadurch sind Messungen unter realen Bedingungen möglich. Dafür werden Zwei-Wellenlängen-Laser benötigt, die jedoch bei etablierten Raman-Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich noch nicht zur Verfügung stehen. Am FBH wurden erstmalig Zwei-Wellenlängen-Lichtquellen bei 532 nm entwickelt, die auf neuen, ebenfalls am Institut hergestellten 1064 nm Y-Lasern basieren. Sie nutzen die Frequenzverdopplung in speziell angefertigten Kristallen und erreichen optische Leistungen von 5 – 6 mW. Der spektrale Abstand der beiden Wellenlängen liegt bei 0,6 nm und die spektrale Breite bei 0,01 nm. Damit erfüllen die Lichtquellen die hohen Anforderungen für einen Einsatz in der Raman-Spektroskopie und für SERDS.

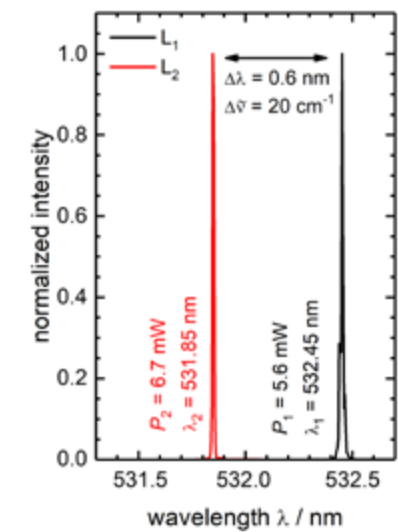


Fig. 3. Single emission spectra obtained at phase-matching condition for both branches.

Towards UV LEDs with high reliability – the role of defects in terms of carrier recombination

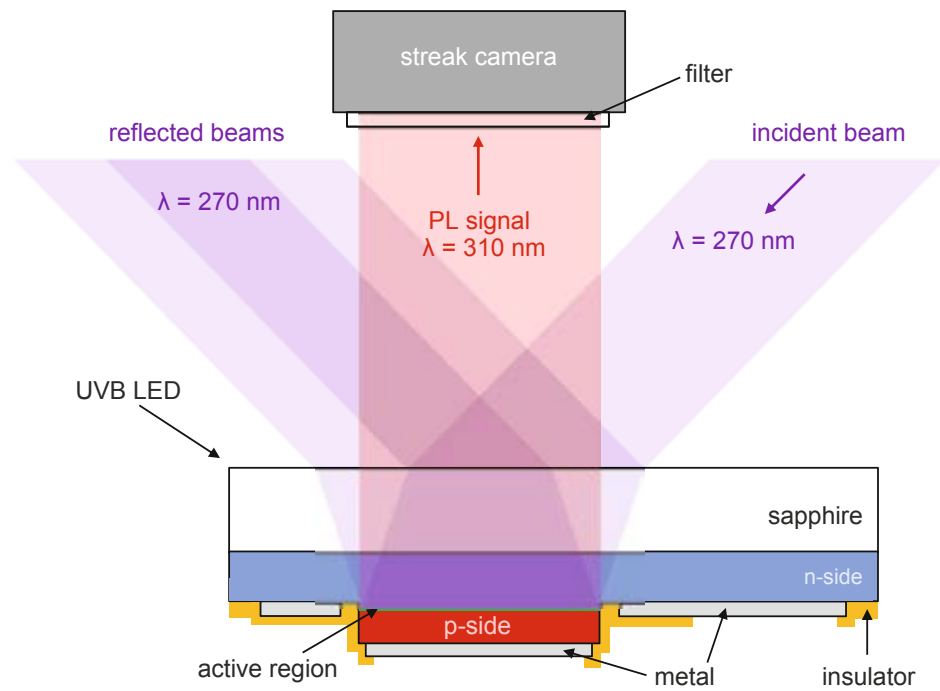


Fig. 1. Schematic diagram of the investigated device structure with the excitation laser beam and the PL signal.

AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes (UV LEDs) with emission wavelengths below 320 nm are promising devices, which are expected to replace discharge lamps in many applications. Wavelengths at about 310 nm, for example, can be used for phototherapy to treat certain skin diseases. Furthermore, LEDs with wavelengths at about 265 nm can be used to efficiently inactivate viruses, bacteria, and fungi, which makes them suitable for the disinfection of surfaces, water, and air. In this respect, UV LEDs could even help to slow down the spread of viruses such as SARS-CoV-2. Currently, the lifetime of those deep-UV LEDs is still shorter than that of LEDs emitting in the UVA and blue spectral region, i.e. their optical power decreases faster during operation. As a result, the applicability of these devices is limited. At FBH, continuous work has been done to better understand the degradation behavior of UV LEDs and to increase their lifetime via targeted adjustments to the manufacturing process.

Previous studies on UV LEDs have attributed the reduction in optical power during operation to the generation or activation of crystal defects in or around the active region of the semicon-

ductor heterostructure. These defects are assumed to act as non-radiative recombination centers for charge carriers and thus reduce the radiative recombination efficiency. This implies that the operation-induced reduction in optical power should be accompanied by a shortening of the charge carrier lifetime. To verify this hypothesis, time-resolved photoluminescence (TRPL) spectra of UVB LEDs were measured during operation in collaboration with the Max Born Institute. The active region was optically excited by a pulsed laser with a peak wavelength of 270 nm. The resulting photoluminescence (PL) transients were detected by a streak camera (Fig. 2a). The decay of the transients served as a measure of the carrier lifetime. In fact, along with a decreasing optical power of the electroluminescence (EL), the decay time was found to decrease with operation time as well (Fig. 2b). This result strongly suggests that an activation or generation of non-radiative recombination centers is responsible for the operation-induced degradation.

This finding was the motivation to generally reduce the number of defects in the semiconductor, and thus also those that can be activated and contribute to degradation. Threading disloca-

tions (TD) are the most obvious defects in the semiconductor which are known to influence the efficiency of the device. The density of TDs, in turn, is essentially dictated by the AlN/sapphire template. Therefore, UVC LEDs with identical heterostructures were fabricated on templates providing different threading dislocation densities (TDD). It turned out, that LEDs with the lowest TDD showed the highest optical power and the slowest degradation during operation (Fig. 3), which resulted in device lifetimes of more than 10,000 hours. Obviously, TDs are related to the operation-induced degradation. This supports the idea that during operation pre-existing defects are activated

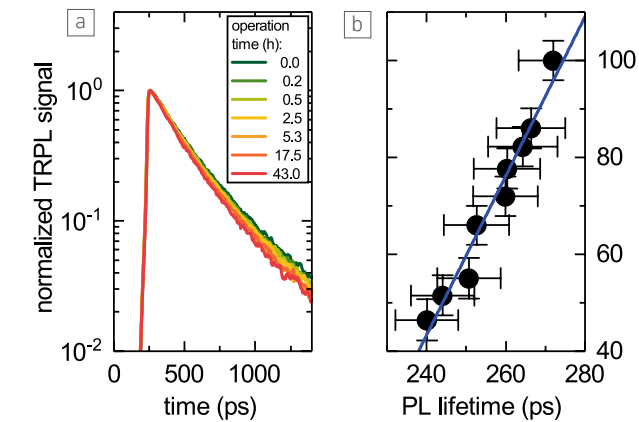


Fig. 2. Normalized PL transients of a UVB LED (a) and correlation of the PL lifetime with the optical power (EL signal) during operation (b).

Das FBH arbeitet intensiv daran, neben der optischen Leistung von UV-LEDs auch deren Langzeitstabilität zu erhöhen. Dazu müssen die physikalischen Mechanismen, die dafür sorgen, dass die optische Leistung während des Betriebs abnimmt, genau verstanden werden. Untersuchungen mittels zeitaufgelöster Photolumineszenz zeigten, dass die Abnahme der optischen Leistung mit einer beschleunigten Rekombination der Ladungsträger einhergeht. Daher ist zu vermuten, dass die Degradation auf eine Aktivierung oder ein Erzeugen von Defekten zurückzuführen ist, die als nicht-strahlende Rekombinationszentren agieren. Um die Anzahl dieser Defekte zu reduzieren, wurde die Versetzungsdichte in der Halbleiterstruktur der LEDs verringert. Geringere Versetzungsdichten führten dabei zu einer deutlich verlangsamten Degradation. Eine Aktivierung von Defekten während des Betriebs erscheint somit plausibel, wobei sich die Versetzungsdichte als kritischer Parameter herausgestellt hat.

and transformed into non-radiative recombination centers. The number of those defects are proposed to scale with the number of TDs. Consequently, a reduction of the TDD in the active region is essential to improve lifetime and optical power of UV LEDs at the same time.

This research was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (Advanced UV for Life, 03ZZ0130A; German Research Foundation (DFG), CRC787).

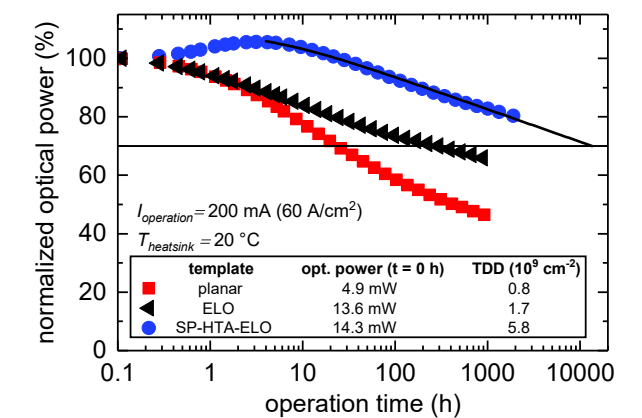


Fig. 3. Relative optical power over time of UVC LEDs on templates with different TDDs.

Publications

J. Ruschel, J. Glaab, F. Mahler, T. Kolbe, S. Einfeldt, J. W. Tomm, "In-situ spectroscopic analysis of the recombination kinetics in UVB LEDs during their operation", Appl. Phys. Lett. 117, 121104 (2020).

J. Ruschel, J. Glaab, N. Susilo, S. Hagedorn, S. Walde, E. Ziffer, H. K. Cho, N. Lobo Ploch, T. Wernicke, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Kneissl, "Reliability of UVC LEDs fabricated on AlN/sapphire templates with different threading dislocation densities", Appl. Phys. Lett. 117, 241104 (2020).



Fig. 1. UV LED irradiation system where the radiation unit with the 120 far-UVC LEDs and the vertical and slanted reflectors are visible.

Spectrally pure far-UVC LED irradiation system for skin-tolerant inactivation of multi-resistant pathogens

The spread of multi-resistant pathogens is a global health problem with nearly 700,000 patients worldwide dying every year from a corresponding infection. UVC radiation can irreversibly inactivate such microorganisms by triggering photochemical reactions in the DNA or RNA. As a result, the microorganisms can no longer replicate, and their potential pathogenic efficacy is inhibited. Furthermore, disinfection of germ-contaminated skin surfaces by direct UV irradiation may be possible without serious damage to health. The reason for this is that far-UVC radiation is mainly absorbed in the uppermost, non-living cornified layer of the skin and potentially causes little damage to the deeper living cells [1]. Using UV LEDs provides distinct advantages for the realization of UVC antisepsis directly on humans in a clinical setting: Due to their small size and robustness, these devices could potentially be used to eradicate the pathogens directly at the infected parts of the human body, such as in the nasal vestibule.

The Joint Lab GaN Optoelectronics, operated by FBH and Technische Universität Berlin, has developed an irradiation system based on tailor-made far-UVC LEDs to study the inactivation of bacteria and skin compatibility of the radiation (Fig. 1). The system comprises 120 LEDs emitting at 233 nm wavelength that are distributed over an area of 80 mm × 80 mm. It is combined with a two-stage aluminum reflector to obtain uniform irradiance over a target area of 70 mm × 70 mm at a distance of 25 mm from the system. To block potential parasitic luminescence at wavelengths > 240 nm that might affect the validity of skin irradiation experiments, a HfO₂/SiO₂-based distributed Bragg reflector was developed. The filter shows over 60% transmission around 230 nm and below 0.05% above 245 nm. Uniformity factors of 93% and 90% are obtained without and with the filter, respectively. The mean value of the irradiance of

the system at a distance of 25 mm is 170 μW/cm² and reduces to 36 μW/cm² when the filter is introduced.

First investigations on inactivating bacteria and skin compatibility of the radiation were carried out by Charité – Universitätsmedizin Berlin and Universitätsmedizin Greifswald [2]. Methicillin-resistant Staphylococcus aureus was used as a model organism due to the great clinical need and the difficulties to inactivate it with antibiotics. Spot tests performed on blood agar plates using Staphylococcus aureus (DSM 11822) showed that a 233 nm UV dose of 40 mJ/cm², which is obtained within 15 minutes with the current system, can inactivate the bacteria strains in concentrations of 2 × 10³ – 2 × 10⁶ cfu/spot (Fig. 2). Porcine skin, a suitable model for human skin, was used to study the skin damage caused by the far-UVC radiation. Irradiation experiments performed with the filter using an irradiation dose of 40 mJ/cm² showed minimal skin DNA damage (3.7% of cyclobutane pyrimidine dimers and 2.3% of pyrimidine (6-4) pyrimidone photoproducts damages) at 233 nm (Fig. 3). This is a factor of 15 to 30 less than with corresponding near-UVC radiation at 254 nm and so low that the skin's natural repair mechanisms can compensate for the induced damage.

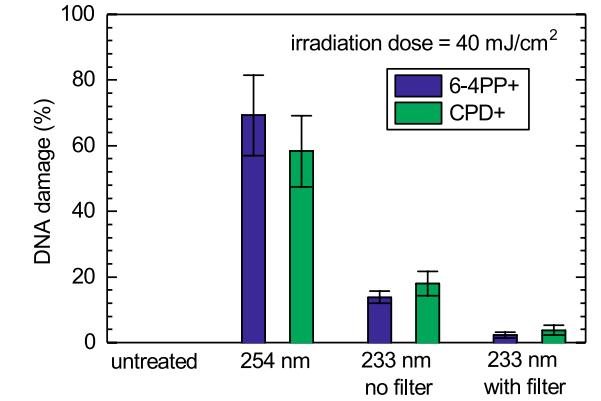


Fig. 3. DNA damage for irradiated porcine skin using 254 nm and 233 nm radiation with 40 mJ/cm². Untreated skin served as control [2].

The results presented on pathogen reduction as well as on animal skin tolerance show that far-UVC LED lamps emitting at 233 nm with moderate irradiation durations can eradicate multi-resistant pathogens without seriously damaging the skin. This work was supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the program "Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation" (consortium "Advanced UV for Life") under grant 03ZZ0146A-D.

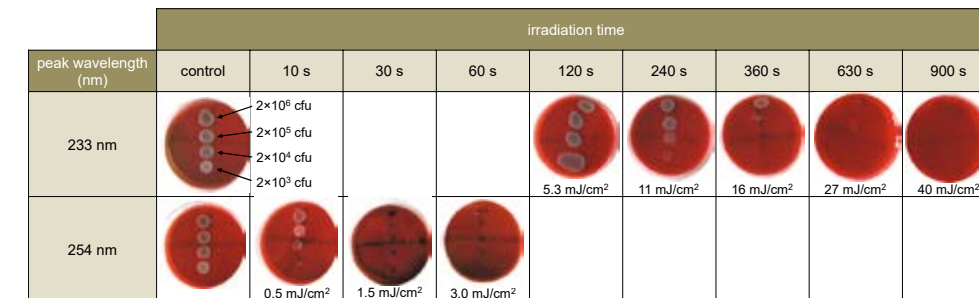


Fig. 2. Columbia blood agar plates with different concentrations of bacterial suspension (MRSA, DSM 11822) without and with UVC irradiation for different times (doses) using either 233 nm or 254 nm radiation [2].

Multiresistente Krankheitserreger wie MRSA verursachen schwere postoperative Infektionen. Um diese künftig ohne Antibiotikaeinsatz inaktivieren zu können, haben das FBH und die TU Berlin ein hautverträgliches Bestrahlungssystem entwickelt. Es ist mit UV-LEDs ausgestattet, die im fernen UVC-Spektralbereich bei einer Peakwellenlänge von 233 nm emittieren. Kombiniert mit einem Spektralfilter liefert das System eine Bestrahlungsstärke von 36 μW/cm². Damit wurden MRSA in verschiedenen Konzentrationen auf Blutagarplatten mit Bestrahlungsdosen zwischen 15 – 40 mJ/cm² inaktiviert. Je nach Analyseverfahren zeigte Schweinehaut, die mit einer Dosis von 40 mJ/cm² bei 233 nm bestrahlt wurde, 15- bis 30-mal geringere DNA-Schäden verglichen mit einer entsprechenden Bestrahlung bei 254 nm. Die durch Fern-UVC-Bestrahlung verursachte Hautschädigung ist so gering, dass die natürlichen Reparaturmechanismen der Haut diese üblicherweise

kompensieren können. Entsprechende LED-basierte Strahler könnten daher bald im klinischen Alltag eingesetzt werden, um multiresistente Erreger direkt am Menschen zu inaktivieren.

Publications

- [1] M. Buonanno, B. Ponnaiya, D. Welch, M. Stanislavskas, G. Randers-Pehrson, L. Smilenov, F. D. Lowy, D. M. Owens, D. J. Brenner, "Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light", Radiation Res. 187, 493-501 (2017).
- [2] 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", accepted for publication in Scientific Reports (2021).
- [3] N. Lobo-Ploch, F. Mehnke, H. K. Cho, M. Guttman, J. Glaab, K. Hilbrich, T. Wernicke, S. Einfeldt, M. Kneissl, "Milliwatt power 233 nm AlGaIn-based deep UV-LEDs on sapphire substrates", Appl. Phys. Lett. 117, 111102 (2020).

Single-mode DBR laser diodes in the blue-violet spectral region

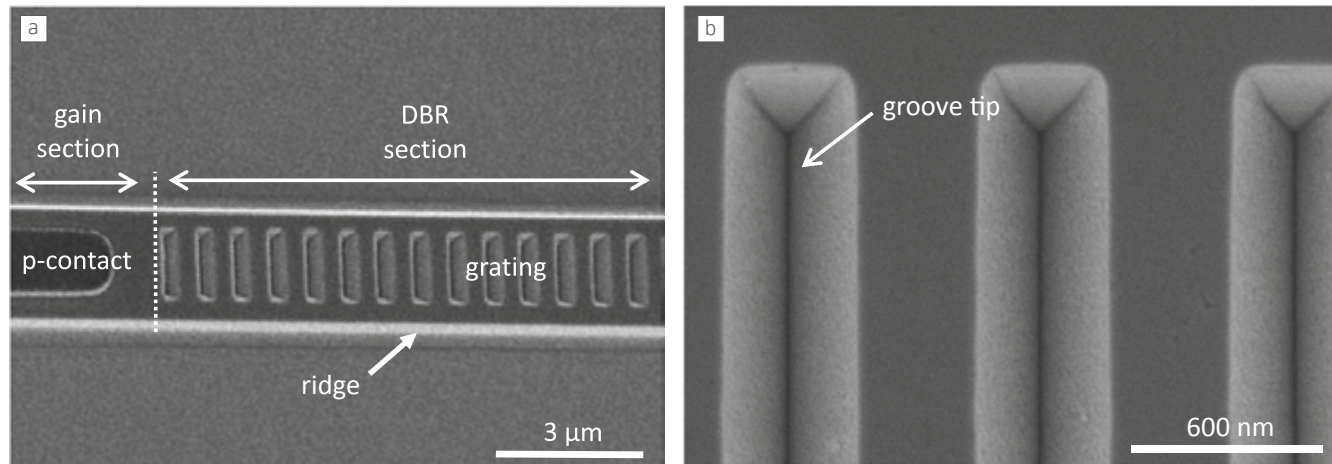


Fig. 1. Scanning electron microscopy images of the 10th order surface gratings with V-shaped grooves fabricated on the ridge of the laser diode.

Gallium nitride (GaN) based laser diodes (LDs) with narrow-band emission in the blue-violet spectral region are interesting light sources for many applications. This is owed to properties like their high modulation bandwidth and ability to freely adjust and tune the wavelength. Such laser diodes are suitable as key element in atom spectroscopy setups, atomic clocks, medical diagnostic equipment, and optical communication systems. Compact single-mode laser diodes can be realized as distributed-feedback (DFB) LDs or distributed-Bragg reflector (DBR) LDs. For short wavelengths, fabricating the required grating structures is challenging. FBH has successfully developed the technology for high-order surface Bragg gratings on GaN, which can replace buried gratings that require a sophisticated two-step epitaxy. In consequence, single longitudinal-mode continuous-wave (CW) operation of DFB LDs emitting around 405 nm could be demonstrated with mode-hop-free operation up to an optical output power of 90 mW. Meanwhile, the first CW-operating GaN-based DBR LD has been demonstrated. It shows single-mode emission with typical periodic mode hopping as the injection current increases and a temperature dependence of the emission wavelength similar to DFB LDs.

The group-III nitride laser heterostructure was grown on 2" GaN (0001) substrates using metalorganic vapor phase epitaxy. The p-type Mg-doped layers were activated by annealing the

wafers in oxygen-containing ambient. The DBR laser is composed of a 200 μm long grating section and a 400 μm long gain section. First, 1.5 μm-wide and 400 μm long Pd/Pt p-contact stripes were fabricated on the gain section. Second, 10th order gratings with 802 nm period were written on the 2 μm-wide ridges with 0.25 μm distance from the edge of the ridge employing electron-beam lithography and plasma etching. The opening angle and the depth of the V-shaped grooves of the grating were precisely adjusted in accordance to simulations (see Fig. 1a, b). Afterwards, the grating was passivated using SiO₂. The rest of the chip process followed standard procedures. The final chips have an antireflection coating (< 0.2 %) on the back facet and a low-reflection coating (25 %) on the front facet. They were mounted p-side up on copper heatsinks.

The laser diodes were operated under CW conditions (see Fig. 2). Threshold current and slope efficiency are typically (80 ± 10) mA and (0.53 ± 0.10) W/A, respectively. From both facets, the L-I curves showed periodic oscillations of the emitted power, indicating the expected mode hops. This is confirmed by the step-like redshift of the lasing wavelength (see Fig. 3). The mode hops to the adjacent short-wavelength cavity mode are caused by thermal detuning of the DBR and gain sections, resulting in different changes of the refractive indices with current.

High-resolution emission spectra of the devices reveal single peak emission at 404.8 nm with a full width at half maximum of 0.03 nm (with the resolution limit of 0.02 nm) and a linear red-shift of the lasing wavelength of 0.019 nm/K over a temperature range of 20 °C to 40 °C.

The feasibility to realize stable single longitudinal-mode DBR laser diodes in the blue-violet spectral region has been successfully demonstrated. The next step is to optimize the design of the devices in detail. This includes the length of the gain section, the coupling coefficient of the grating, and the length of the DBR section.

This work was supported by the European Fund for Regional Development of the European Union in the framework of the Berlin-Polish joint project "From UV to blue – Reliable laser sources for environmental monitoring (RelyLa)".

Die Nachfrage nach kompakten Laserlichtquellen mit schmalbandiger Emission im blau-violetten Spektralbereich ist in den letzten Jahren gestiegen. Dies hat auch die Entwicklung von Longitudinal-Singlemode-Laserdioden auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) befördert. Erst kürzlich hat das FBH erstmalig den Dauerstrichbetrieb von GaN-basierten DBR-Laserdioden demonstriert. Sie wurden mit der am FBH etablierten Technologie der Oberflächen-Bragg-Gitter hoher Ordnung hergestellt, die ursprünglich für GaAs-basierte DFB-Laserdioden entwickelt worden war. Die DBR-Laserdioden mit Gittern 10. Ordnung auf einem 2 μm breiten Rippenwellenleiter zeigten Singlemode-Emission bei 404,8 nm mit einer Halbwertsbreite von 0,03 nm. Die lineare Rotverschiebung der Laserwellenlänge mit steigender Temperatur von 0,019 nm/K entspricht jener von DFB-Laserdioden. In der Leistung-Strom-Kennlinie sind die typischen periodischen Modensprünge in die benachbarte kurzwellige longitudinale Fabry-Pérot-Resonanzmode erkennbar. Mit dieser DBR-Laserdiode eröffnet sich ein technologisch alternatives Konzept, mit dem kurzwellige Singlemode-Laserdioden in kompakter Bauweise realisiert werden können. Im nächsten Schritt soll nun das Chipdesign weiter optimiert werden.

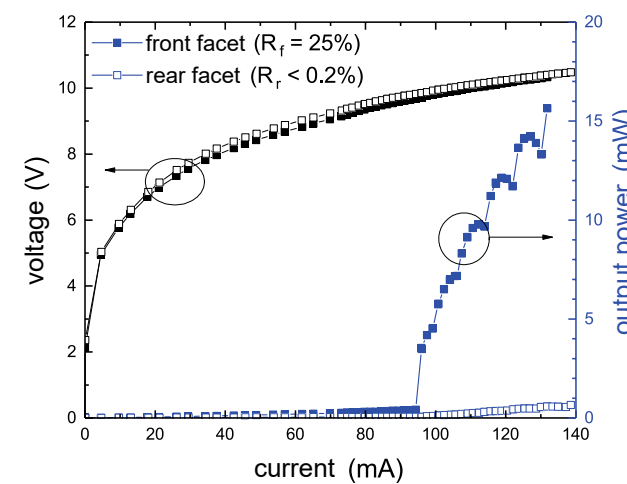


Fig. 2. Continuous-wave optical power-current-voltage characteristics of a DBR laser diode.

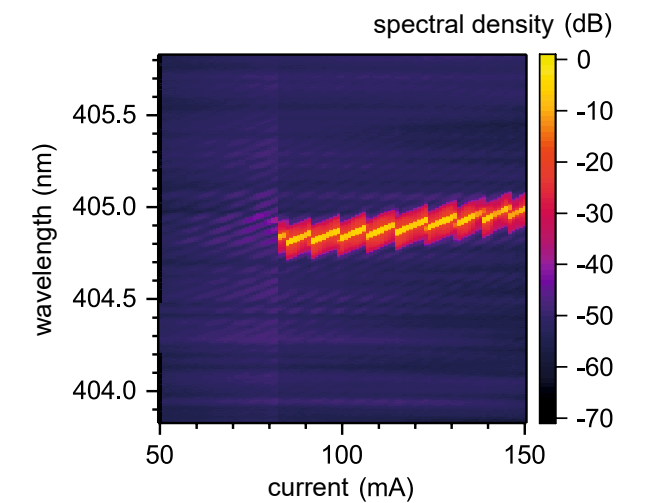


Fig. 3. 2D color map of emission spectra of a DBR laser diode operated in continuous-wave mode at different currents.

Integrated Quantum Technology

Integrierte Quantentechnologie

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

- > **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 put on narrow and ultra-narrow linewidth diode lasers.
- > **Integrated quantum sensors** – using high-precision spectroscopy techniques with atomic or molecular ensembles either at room temperature or, by laser cooling, near absolute zero. Realization of instruments for highly accurate measurements of physical quantities such as frequency, accelerations, 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. Aim is to entangle single quantum memories with single photons, thus providing the basis for secure and versatile future quantum communication and information platforms.
- > **Photonic quantum technologies** - development of optical chip-based quantum devices built on low-loss chip-integrated optical components that can be directly interfaced with optical fibers. Ultimately, ultra-strong optical nonlinearities will be co-integrated into a quantum chip.

In seinem Forschungsbereich Integrierte Quantentechnologie führt das FBH F&E-Aktivitäten durch, mit denen Proof-of-Concept Demonstratoren der Quantentechnologie (QT) aus dem Labor in industrietaugliche Lösungen überführt werden. Dies wird der zweiten Quantenrevolution den Weg ebnen, sodass sie ihr Potenzial für die Gesellschaft von morgen entfalten kann. Zu den adressierten Anwendungen zählen die Quantensensorik, die Quantenkommunikation und das Quanten-Computing – außerhalb des Labors im Feld ebenso wie im Weltraum. Aktuell setzt das 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 Lasern mit schmalbandiger und ultra-schmalbandiger Emission.
- > **Integrierte Quantensensoren** – Realisierung neuartiger Sensoren mittels hochpräziser Spektroskopiemethoden. Hierfür werden atomare oder molekulare Ensembles benötigt, die bei Raumtemperatur oder – lasergekühlt – nahe dem absoluten Nullpunkt untersucht werden. Dies erlaubt 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. 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.
- > **Quantenphotonische Technologien** - Entwicklung chipbasierter optischer Quantenbauelemente, bestehend aus chipintegrierten optischen Komponenten mit geringen Verlusten, welche direkt mit optischen Fasern verbunden werden können. Langfristig sollen ultrastarke optische Nichtlinearitäten in einen Quantenchip mitintegriert werden.

Fabrication and characterization of novel defect centers in diamond nanostructures for optical quantum technology

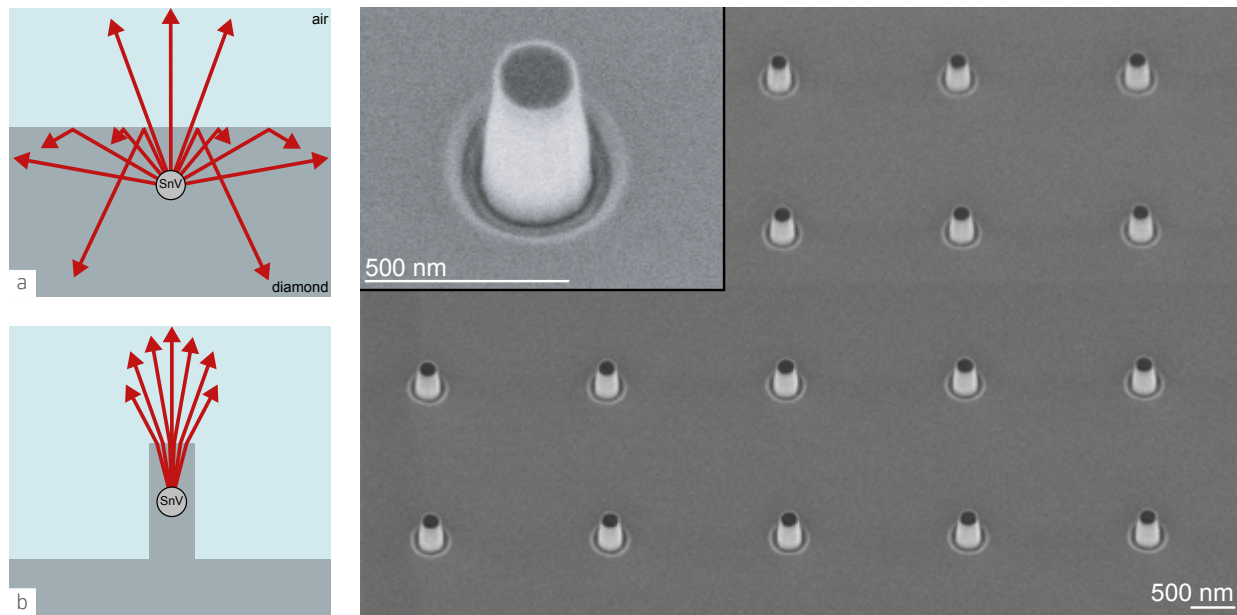


Fig. 1. a) Most of the light emitted by the tin vacancy is backscattered at the interface due to total internal reflection. The final collection efficiency from the top is low. b) When the defect center is situated inside a nanopillar, the emitted light is guided along the nanostructure and a larger portion of it can be efficiently collected by a microscope objective placed above the sample.

Fig. 2. Scanning electron micrograph showing a bird's eye view of the fabricated nanopillars with about 200 nm diameter and about 500 nm height. Inset: close-up view of a single nanopillar.

Defect centers in diamond constitute a highly attractive system for future quantum technology applications. Their ability to emit single photons both at room and cryogenic temperatures, for example, makes them a promising platform for the development of highly efficient quantum light sources. The large refractive index contrast between diamond and air, however, hinders the collection of light from the defect center due to total internal reflection (Fig. 1a). Fabricating nanostructures around the defect centers improves the extraction of the light and higher collection efficiencies can be achieved (Fig. 1b).

Towards the realization of such nanostructure-defect center devices, the FBH is cooperating with the Integrated Quantum Photonics group at Humboldt-Universität zu Berlin (HU). The joint activities aim at establishing new and stable processes to

fabricate both diamond nanostructures and single defect centers. The first devices to be successfully fabricated at FBH are nanopillars with a diameter of about 200 nm and a height of 500 nm (Fig. 2).

FBH has developed the nanopatterning technology and handling techniques for mono-crystalline diamond samples with dimensions of $3 \times 3 \times 0.3 \text{ mm}^3$ using state-of-the-art semiconductor manufacturing equipment. After cleaning the polished surface using Cl_2 - and O_2 -based dry etch processes, 10^{11} tin ions/ cm^2 were implanted into the diamond sample. Subsequently, the samples were annealed at the Walter-Schottky Institute for about 12 hours at $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ to generate tin-vacancy (SnV) defect centers in the diamond lattice. Back in FBH's cleanroom, the nanostructures were patterned in ZEP resist by electron beam

lithography and transferred into a silicon nitride hard mask by reactive ion etching. Then, the diamond was etched by an inductively coupled plasma (ICP) process applying oxygen gas only and an etching recipe optimized to obtain nanopillars with nearly vertical sidewalls. Finally, the silicon nitride hard mask was selectively removed to expose the diamond surface. Fig. 2 shows a scanning electron micrograph of the fabricated devices.

After nanopillar fabrication, the sample was characterized in the HU labs to determine whether single SnV defect centers were incorporated into the pillars. In a confocal microscope setup, selected single pillars were excited with a laser centered at 520 nm. The resulting fluorescence spectra were collected both at room and cryogenic temperatures. An example of the recorded signal from a single SnV is shown in Fig. 3a. Isolated peaks corresponding to the expected optical transitions of the SnV could be detected (Fig. 3b and c), thus proving the formation of single or multiple defect centers. To further confirm the presence of single SnV defects, time-resolved measurements were performed, and a typical second-order autocorrelation function was recorded as shown in Fig. 4. Detected values below 1 at $\tau = 0$ demonstrate the single-photon nature of the emitted light and thus successful fabrication of quantum-light sources.

This research was supported through the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF, project DiNO-Quant, 13N14921) and the European Research Council (ERC Starting Grant "QUREP"). FBH and HU are now further investigating the SnV defect center properties and are aiming to implement quantum information protocols with these – taking advantage of increased collection efficiencies compared to bulk samples.

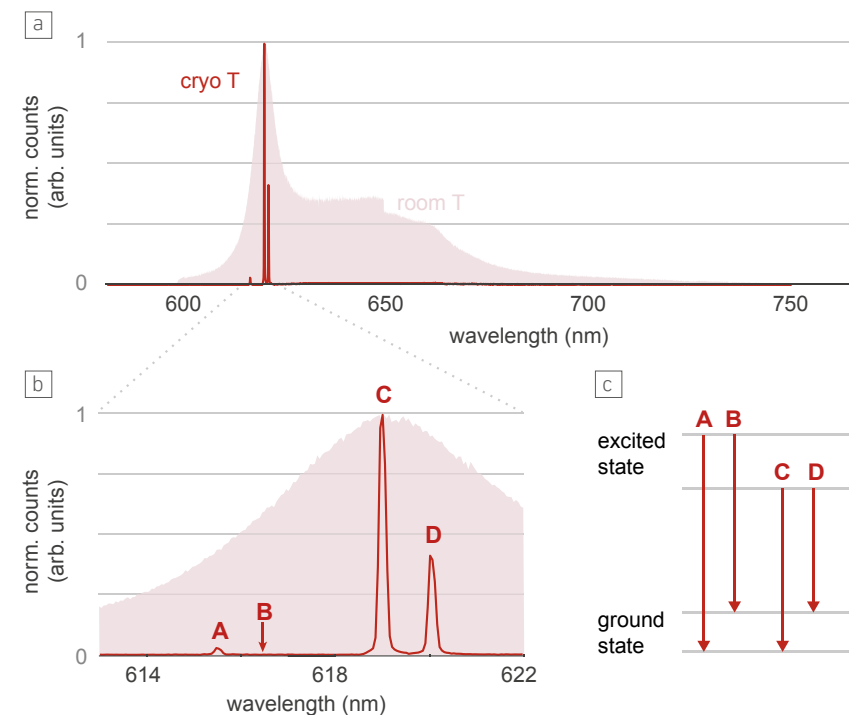


Fig. 3. a) Spectrum of a single SnV defect center collected at room and cryogenic temperature ($T = 8 \text{ K}$). The large phononic side band visible at room temperature is suppressed to about 50% when the temperature is lowered. b) Zoom into the spectral range of the zero phonon line of the SnV. The detected peaks originate from the optical transition characteristics of tin vacancies. c) Energy levels and expected optical transitions of an SnV defect.

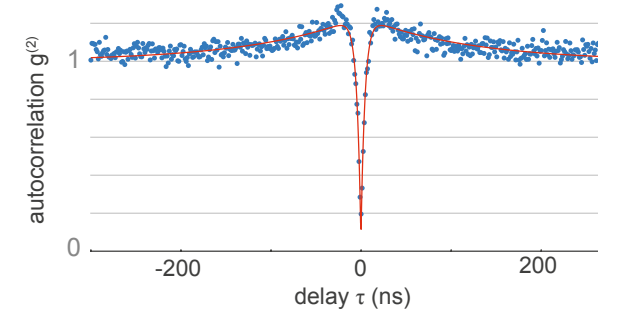


Fig. 4. Second-order autocorrelation function of a single SnV defect center. From the fit (red line) of the dataset (blue points), a fluorescence lifetime of $(4.4 \pm 0.3) \text{ ns}$ and a $g^{(2)}(0) = 0.09$ are extracted.

Als Licht-transparente Form des Kohlenstoffs bietet Diamant besondere Materialeigenschaften wie hohe Festigkeit und hohe thermische Leitfähigkeit. Hinzu kommt die sehr große Bandlücke, die dem Material neue Einsatzmöglichkeiten in Forschung und Entwicklung eröffnet. Diese Eigenschaft will das neu gegründete Joint Lab Diamond Nanophotonics von FBH und HU Berlin nutzen und Ansätze für zukünftige Anwendungen auf dem Gebiet der Quantenphotonik entwickeln. Die Partner erproben darin neue Fertigungstechnologien, um Quantenlicht in Form einzelner Photonen für optische Quantentechnologien zu erzeugen, zu leiten, einzufangen und zu manipulieren. Am FBH wurden dazu neue Prozessschritte entwickelt, mit denen Defektzentren hergestellt wurden. Diese wurden mittels Implantation mit thermischer Nachbehandlung und Diamantätzungen über Hartmaskenstrukturierung mit Trockenätzverfahren nach hochauflösender Elektronenstrahlbelichtung gefertigt. Erste optische Messergebnisse an $3 \times 3 \text{ mm}^2$ großen Diamant-Proben mit Nanostrukturen zeigen, dass diese Strukturen nachweislich einzelne Photonen emittieren können.



Fig. 1. The Galileo fleet in space.

Ultra-narrow linewidth GaAs-based DBR lasers for spaceborne data transfer and optical atomic clocks

Lasers with excellent spectral stability are key components for innovative solutions such as satellite-to-satellite laser communication terminals and high-precision global positioning systems utilizing optical atomic clocks. The deployment of such advanced photonic devices in challenging environments is very expensive. Improving these devices by making them smaller, cheaper and more efficient reduces system costs. This enables the technology to bring widespread benefits to science and everyday life.

The semiconductor laser is the light source of choice for miniaturized photonic devices. Meeting the noise requirements for the applications mentioned above, however, remains challenging. So far, low-noise monolithic diode lasers typically exhibit a 3 dB spectral linewidth of several hundreds of kilohertz to a few megahertz. This figure can be improved by adding external optical elements such as lenses and gratings to the optical cavity, forming an extended cavity. Such an extended cavity diode laser (ECDL) typically exhibits a 3 dB linewidth well below 100 kilohertz during a measurement time of 1 millisecond.

To allow for operation outside of optical labs, hybrid micro-integration technologies have been developed by FBH. They provide sufficiently small form factors as well as the required robustness. However, the hybrid micro-integration of external optical elements is a costly process. Moreover, since nanometer-scale deformations of the optical setup strongly influence the relative alignment of the components and hence the electro-optical performance, the final devices are usually still susceptible to mechanical deformation. Furthermore, the necessary thermal control of external optical elements complicates the design of the laser module.

FBH has developed a novel diode laser chip emitting light at 1064 nm which combines the best out of both worlds: A monolithic, chip-scale design and implementation of the narrow linewidth ECDL laser concept. Fig. 2 shows an ECDL module and the novel monolithic extended cavity diode laser (mECDL). This mECDL has been made possible by the development of an advanced epitaxial growth technique. Between two epitaxy steps, the light-emitting quantum well layer is removed in specific

sections of the chip to create the low-loss part of the optical cavity that constitutes the distinguishing feature of an ECDL. So far, a 3 dB linewidth of 25 kHz @ 1 ms has been demonstrated with an 8 mm long mECDL. To the best of our knowledge, this is the smallest linewidth achieved with a monolithic laser design. Fig. 3 shows the noise power spectral density of three types of diode lasers.

In a next step, research efforts will aim at transferring the concept to a different material system. An mECDL emitting at 778 nm wavelength shall be realized to serve as the local oscillator of a very compact optical atomic clock based on the two-photon transition in rubidium.

This work has been supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under grant number 50RK1972. A patent application is pending under file reference number 10 2021 103 337.3.

Das FBH hat einen ultra-schmalbandigen Laserchip mit Bragg-Gitter bei einer Wellenlänge von 1064 nm realisiert. Dieser überträgt das Konzept eines hybrid-integrierten Halbleiterlasers mit erweitertem Resonator (*extended cavity diode laser*, ECDL) erfolgreich auf einen einzelnen Chip (monolithischer ECDL). Durch Kombination von aktiven und passiven Wellenleitern und Bragg-Reflektoren wurden erstmalig – im Vergleich zu etablierten DBR-Lasern – lange Resonatoren realisiert, die die spektrale Linienbreite des emittierten Lichts verringern. Für die Herstellung monolithischer ECDL wird eine Zweischrittepitaxie eingesetzt. Dabei wird die aktive

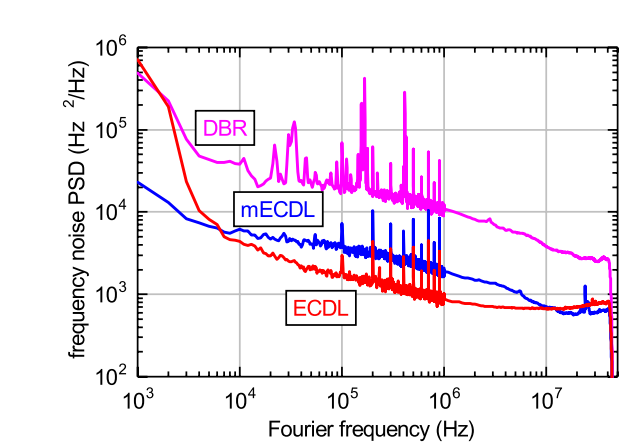
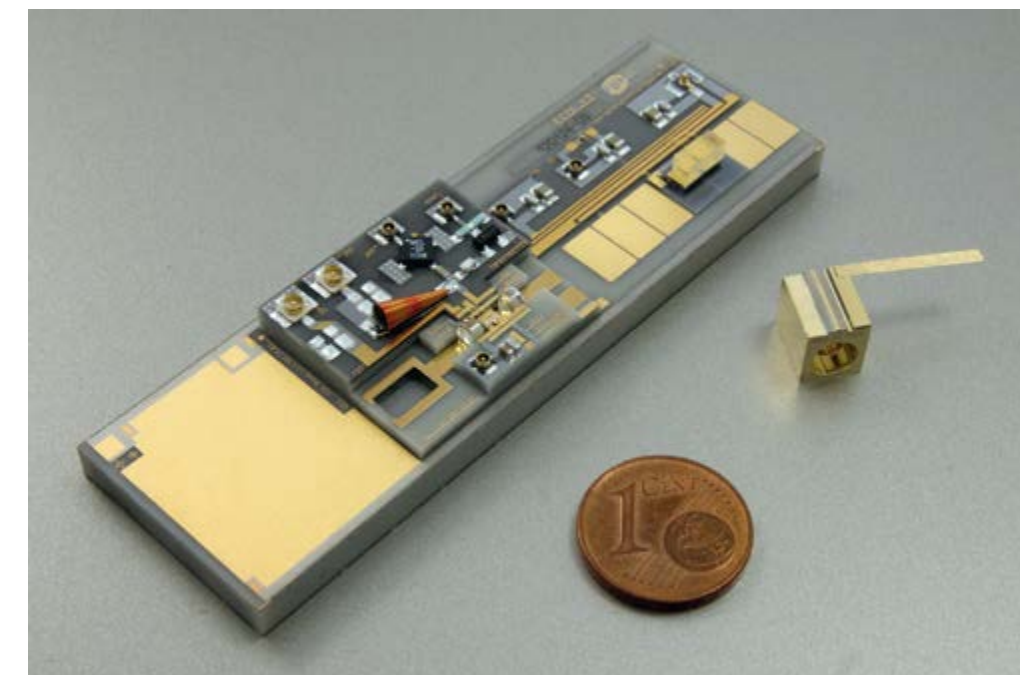


Fig. 3. Comparison of the frequency noise power spectral density (PSD) for three types of narrow linewidth semiconductor lasers. The spikes between 100 kHz and 1 MHz are measurement artefacts.

Zone am Ende des ersten Epitaxie-Schrittes durch Ätzen selektiv entfernt, bevor im zweiten Epitaxie-Schritt der vertikale Schichtaufbau abgeschlossen wird. Der Bereich mit selektiv entfernter aktiver Zone bildet den passiven und somit verlustarmen Wellenleiter- und Bragg-Reflektor-Abschnitt des optischen Resonators. Verglichen mit konventionellen ECDLs bietet das monolithische Design eine höhere mechanische Stabilität des optischen Resonators, ist thermisch besser durchstimmbar auf Zeitskalen von Millisekunden und punktet mit geringeren Fertigungskosten.



Publications

S. Wenzel, O. Brox, P. Della Casa, H. Wenzel, A. Knigge, B. Arar, S. Nechayev, S. Kreuzmann, A. Wicht, "Ultra-narrow linewidth GaAs-based DBR Lasers", Conference on Lasers and Electro-Optics, ATh4G.3 (2021).

O. Brox, H. Wenzel, J. Fricke, P. Della Casa, A. Maaßdorf, M. Matalla, S. Wenzel, A. Wicht, A. Knigge, "Novel 1064 nm DBR lasers combining active layer removal and surface gratings", Electron. Lett., <https://doi.org/10.1049/ell2.12192> (2021).

Fig. 2. Significantly more compact: monolithically integrated extended cavity diode laser chip on C-mount (r.) and its micro-assembled counterpart (l.).

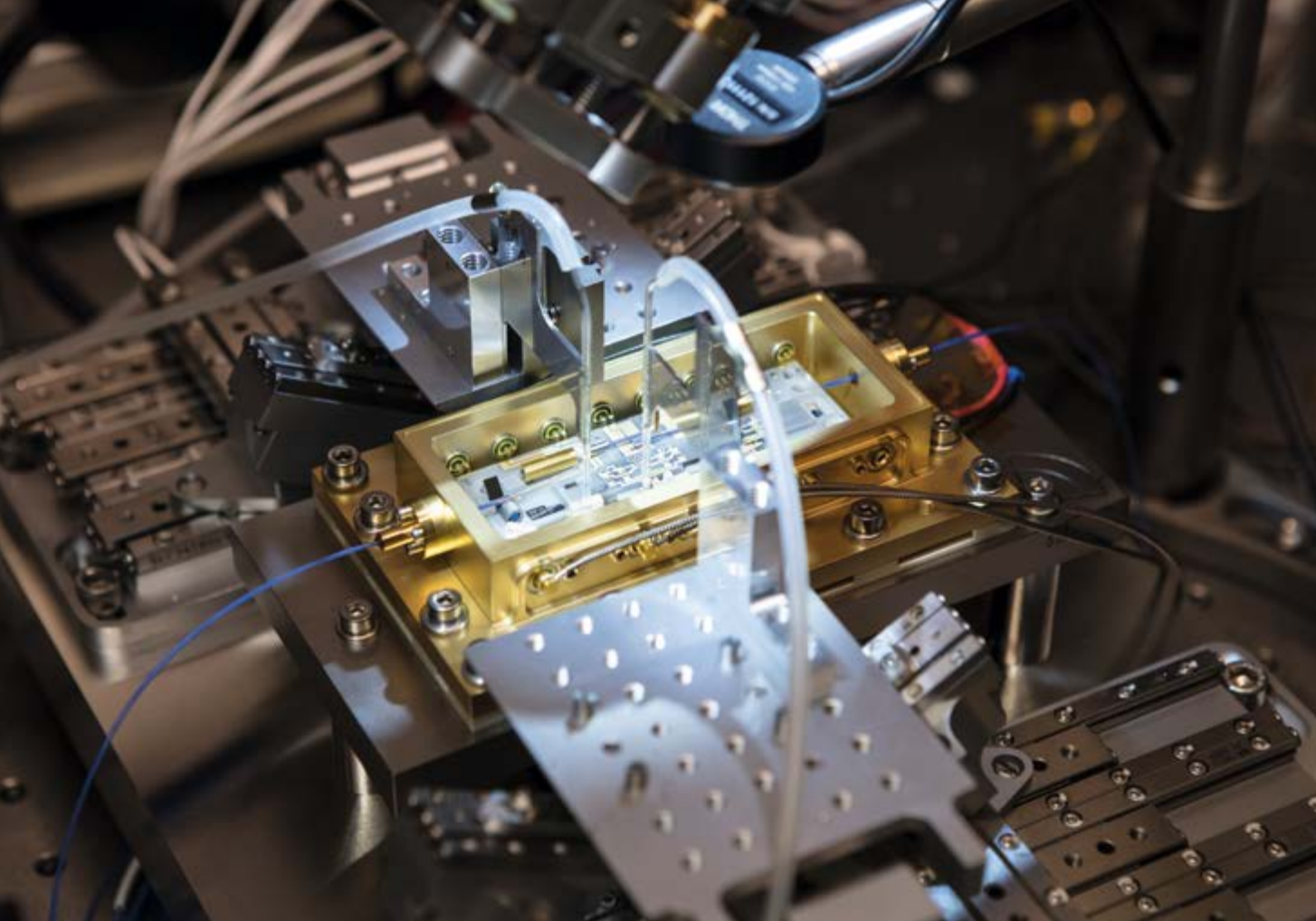


Fig. 1. Alignment of optical elements into a hybrid micro-integrated laser module.

Automation of laser assembly processes – machine learning to align complex electro-optical setups

FBH will deliver 55 highly complex hybrid micro-integrated diode laser modules [1] for the BECCAL project [2]. BECCAL aims at implementing a user facility on board of the international space station ISS for experiments with ultra-cold atoms, scheduled to be launched in 2025. In order to fulfil this requirement, FBH is in the process of advancing its assembly technologies from a one-of-a-kind approach to a highly reliable and efficient small series manufacturing process. This requires, amongst other measures, developing automated alignment procedures that are capable of multi-dimensional optimization in the presence of noise. How such laser modules are assembled using positioning robots is shown in Fig. 1.

The Joint Lab Quantum Photonic Components has evaluated various alignment optimization strategies. Theoretical studies and simulations revealed that approaches based on machine learning surrogate modeling outperform traditional gradient-descent approaches in optimization tasks in the presence of noise. For this reason, machine learning surrogate modeling has not only become the standard for modeling and optimizing processes with high computational cost, it also holds great potential for the automation of the optical alignment of complex photonic modules. Among the different machine learning surrogate modeling methods, Bayesian optimization with Gaussian processes (BOGP) seems to best meet the requirements for automated alignment optimization of complex optical systems.

BOGP uses a non-parametric statistical surrogate model to estimate the alignment of a complex optical setup. This surrogate model improves the accuracy of the estimation by exploring the parameter space step by step, which constitutes the learning process.

Exemplary, we are evaluating automated alignment of an adjustable telescope that couples laser light emitted from a single-mode optical fiber into the single transverse mode of a semiconductor optical amplifier (SOA). The optimization task requires simultaneous adjustment of six cross-correlated degrees-of-freedom (DOF): the alignment or collimation of a telescope lens (1x), the alignment of a mirror (2x) and of a focusing lens (3x). Cross-correlation between these DOF naturally arises due to unavoidable misalignment of the optical components' axes with respect to each other and to the propagation direction, e.g., slight tilt of the telescope. The power emitted by the SOA is determined with an optical power meter and serves as figure of merit for the optimization process, which is moreover affected by noise and drift.

In Fig. 2, the performance of the BOGP algorithm and the downhill-simplex algorithm on the six DOF alignment problem were simulated. In these simulations, BOGP converges significantly faster than the downhill-simplex algorithm. In order to evaluate the performance of the BOGP algorithm in real-life conditions, also multiple automated alignment trials on the Fiber-to-SOA coupling setup were performed. Fig. 3 presents the experimental result of 21 optimization runs using BOGP. The optimized solutions are distributed within 3 % of the maximum achieved optical power, and they required relatively low number of < 100 steps. These first experimental results illustrate the superiority of BOGP surrogate modeling in real-world optimization applications. Our results validate the potential that machine learning surrogate models hold for automated alignment and optimization of complex photonic setups.

This work is supported by the German Space Agency (DLR) with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under grant number DLR 50WP1704.

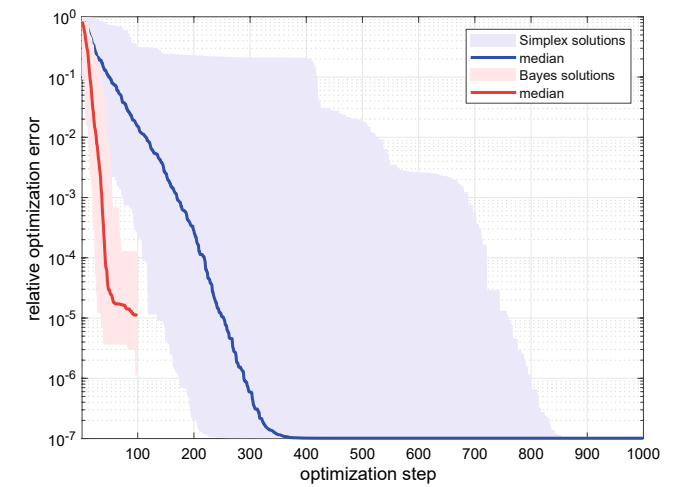
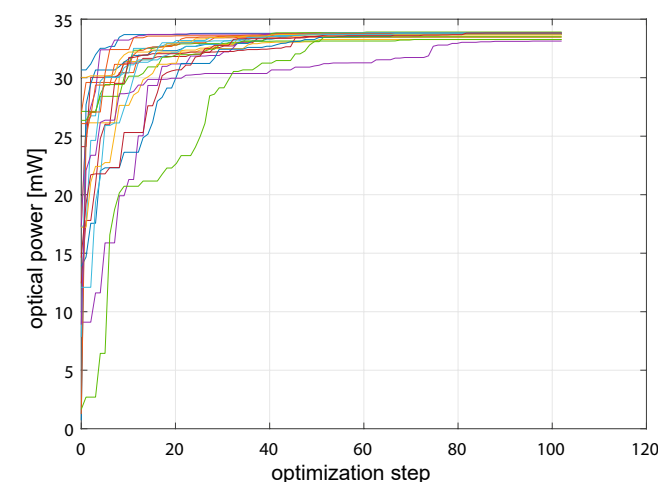


Fig. 2. Simulated optimization of six DOF for coupling a single-mode fiber to a single-transverse-mode laser chip using Bayesian optimization and downhill-simplex algorithm. The graphs show the relative error to the optimum vs. the optimization step.

Automatisierte Verfahren, mit denen optische Elemente bei der Justage komplexer optischer Systeme präzise ausgerichtet werden, sind für den Aufbau hybrid mikro-integrierter Diodenlaser-Module unverzichtbar. Sie gewährleisten ein zuverlässiges und effizientes Assembly. Das Projekt BECCAL macht nun den Schritt von einer hochspezialisierten Einzelhin zu einer Kleinserienfertigung notwendig. Für den Aufbau von 55 weltraumtauglichen Lasermodulen entwickelt das Joint Lab Quantum Photonic Components effiziente Verfahren, um optische Systeme automatisiert zu justieren. Simulationen zeigen das Potential maschineller Lernverfahren bei der Lösung komplexer optischer Justageprobleme. Die Leistungsfähigkeit solcher Verfahren wurde inzwischen auch in einer ersten experimentellen Umsetzung nachgewiesen. Mithilfe eines Bayes'schen Optimierungsverfahrens wurden die insgesamt sechs Justage-Freiheitsgrade eines optischen Systems für die Einkopplung von Laserstrahlung in einen Halbleiter-basierten optischen Verstärker zuverlässig optimiert.

Publications

[1] C. Kürbis, A. Bawamia, M. Krüger, R. Smol, A. Peters, A. Wicht, G. Tränkle, "Extended cavity diode laser master-oscillator-power-amplifier for operation of an iodine frequency reference on a sounding rocket", *Appl. Opt.* 59, 253-262 (2020).

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

Fig. 3. Automated experimental optimization of the coupling alignment for the SOA coupling setup, based on BOGP. The graph shows the optical output power of the SOA vs. the number of the optimization step.

Development of micro-optical isolators based on $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ as the magneto-optical material

Optical isolators are components that exhibit a direction-dependent transmission of light. They are used to protect diode lasers against optical feedback that deteriorates their electro-optical performance or may even damage them. Commercially available semi-stage optical isolators typically provide a transmission close to 90 % (insertion loss well below 1 dB) along the forward direction, whereas they reach an attenuation (isolation) of 30 dB along the reverse direction. The availability of very compact, micro-optical isolators is a prerequisite for the hybrid micro-integration of diode laser modules. YIG-based technical solutions exist for wavelengths beyond 1050 nm. These can also be applied near 780 nm where they, however, show a significant insertion loss up to a couple of dB.

Together with its partners, SpaceTech GmbH and the Freiburger Materialforschungszentrum (FMF), FBH is developing a micro-isolator platform suitable to serve the wavelengths below 1050 nm. The critical aspects of this solution are the availability of precisely fabricated, miniaturized magnets (FeNdB) with a remanence exceeding 1.3 T and the disposability of a magneto-optical material that can be optimized for the specific wavelength of interest (Fig. 1). For the latter $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ has been chosen. The growth of corresponding crystals is underway at FMF. By proper adjustment of the stoichiometric ratio of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, different

crystals can be realized, which altogether support the wavelength range between 590 nm ... 920 nm. The key aspect of successfully realizing an optical microisolator is the sensitive choice of components with regard to three properties: (i) the magnetic material, which determines the remanent magnetization, (ii) the stoichiometric ratio of the $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, which determines the volumetric absorption as well as the ability of the crystal to rotate the polarization of light when exposed to a magnetic field (Verdet constant), and (iii) the length of the crystal. Their interplay decides on the final performance of the optical isolator.

To optimize these design parameters, FBH has experimentally investigated the Verdet constant and the volumetric absorption of $\text{Cd}_{0.81}\text{Mn}_{0.19}\text{Te}$ crystals for the wavelength range between 740 nm and 950 nm as shown in Fig. 2. For three different lengths of a $\text{Cd}_{0.81}\text{Mn}_{0.19}\text{Te}$ crystal (0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm), the volumetric absorption and the magnetic field strength were calculated, which would be necessary to realize a Faraday rotation of 45 deg required for an optical isolator. Considering a magnetic material with strongest remanent magnetization (FeNdB) and assuming the magnet design depicted in Fig. 1, optical isolators based on $\text{Cd}_{0.81}\text{Mn}_{0.19}\text{Te}$ with volumetric optical losses of less than 20 % seem feasible for the wavelength range between 730 nm and 810 nm. This is indicated by the gray area in Fig. 2.

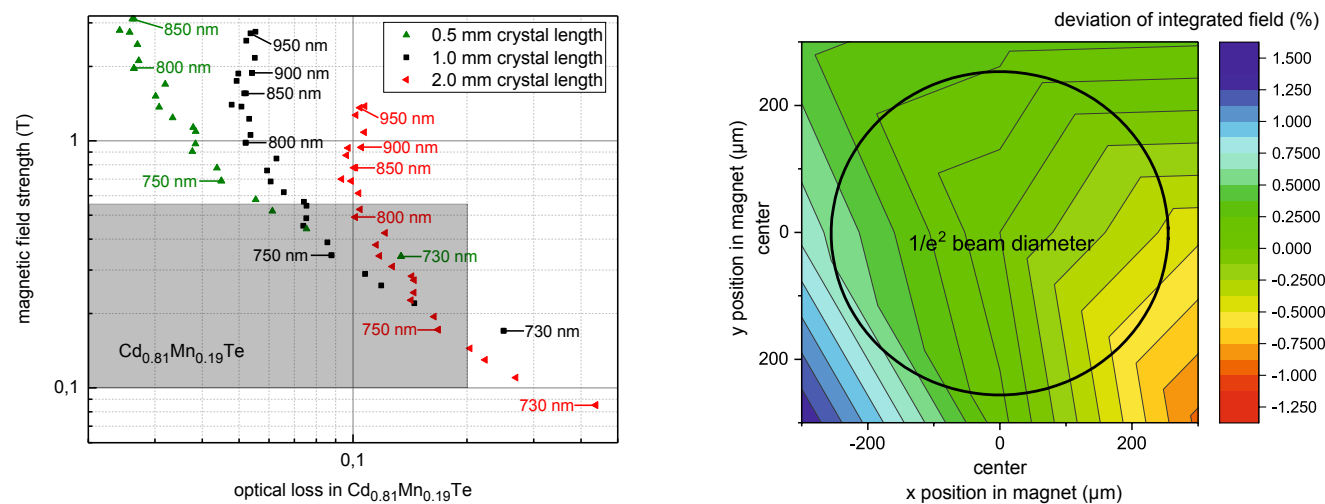


Fig. 2. Equi-polarization rotation lines (45°) as a function of the optical losses and the magnetic field strength plotted for a $\text{Cd}_{0.81}\text{Mn}_{0.19}\text{Te}$ crystal with different lengths. The gray area indicates magnetic field strengths inside the cutout of the magnet (compare Fig. 1) that can be reached by commercial magnets.

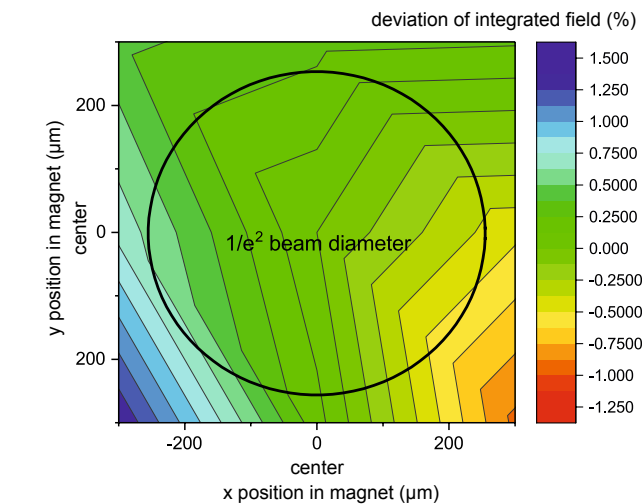


Fig. 3. Integrated field inhomogeneity of a 2 mm crystal positioned in the center of a magnet as depicted in Fig. 1, a typical beam diameter of $500 \mu\text{m}$ is indicated.

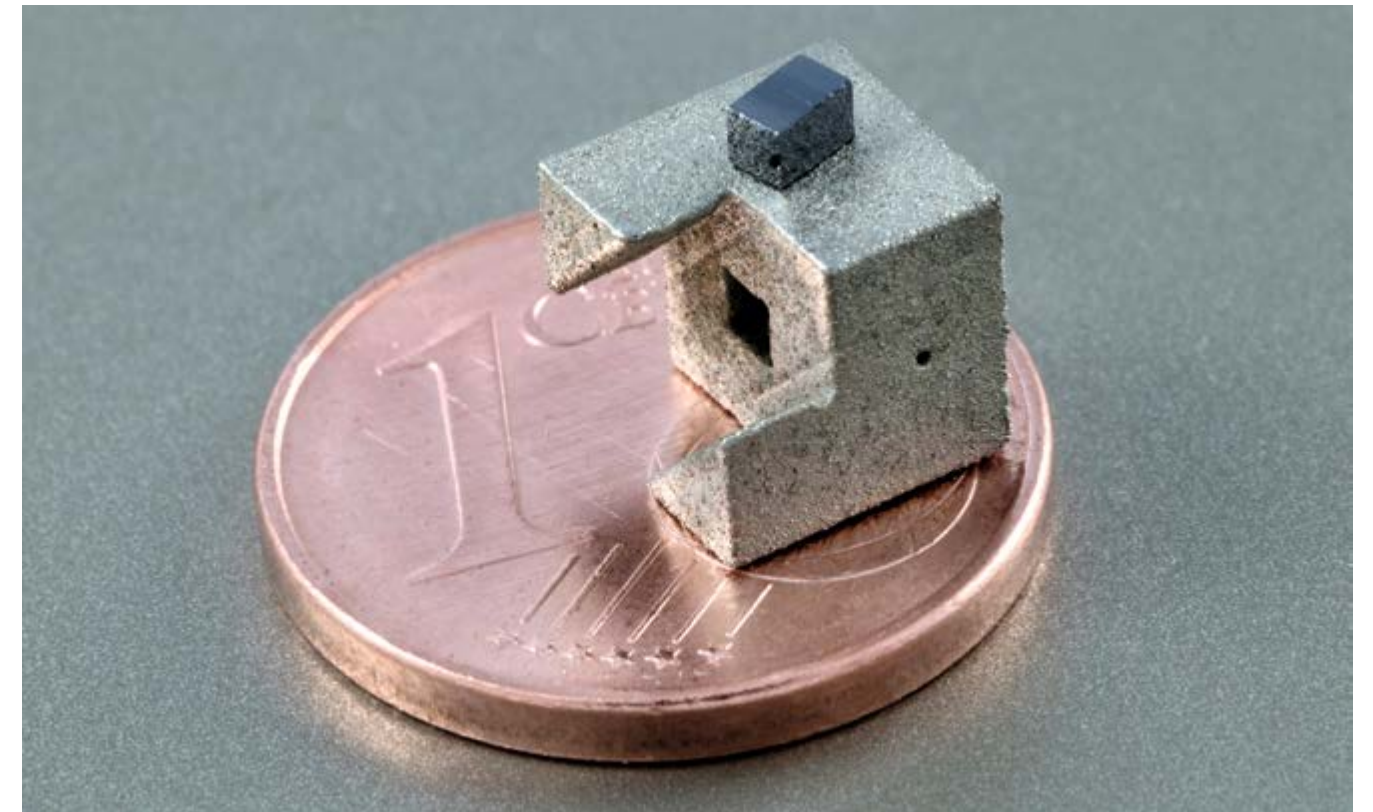


Fig. 1. FeNdB magnet (bottom) and a $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystal (top). Dimensions of the crystal are $1.4 \times 1.4 \times 2.0 \text{ mm}^3$. Crystal provided by International Crystal Laboratories.

Another important measure of an isolator is the depolarization of the laser beam that is possibly introduced by a non-uniform Faraday rotation. Depolarization limits the isolation and should be minimized. To analyze this effect, the magnetic field of the magnet depicted in Fig. 1 was calculated. To determine a measure for the inhomogeneity of the Faraday rotation, the magnetic field was integrated along different paths that run parallel to the beam propagation direction and are located inside the crystal ($\int B(x,y,z) \cdot dz$). The result is shown Fig. 3 for a 2 mm long crystal. As can be seen for a typical beam diameter of $500 \mu\text{m}$ ($1/e^2$), variations of the integrated field are at the level of a few % only, which corresponds to a PER well above 30 dB.

These results clearly indicate that CdMnTe may serve as a generic magneto-optic crystal material to realize micro-optical isolators for the wavelength range accessible to GaAs diode lasers.

This work is supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within "Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten-Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas)" under ref. 13N14906, the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02, and by the European Space Agency (ESA) under contract no. 4000127196/19/NL/FE/hh.

Publications

L. Kowalczyk, A. Mycielski, L. Śniadower, and R. R. Gałazka, "CdMnTe single crystals for room temperature optical isolator", Phys. Stat. Sol. (c) 1, No. 4, 985-988 (2004).

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

Ohne kompakte optische Isolatoren ist die hybride Mikrointegration von Diodenlasermodulen nicht möglich. Geeignete YIG-basierte Isolatoren sind zwar verfügbar, können derzeit aber nur bei 780 nm und oberhalb von 1050 nm eingesetzt werden. Das FBH entwickelt daher eine Plattform, um mikro-optische Isolatoren für den Wellenlängenbereich von circa 590 – 920 nm zu realisieren. Dazu müssen insbesondere kompakte FeNdB-Magnete mit einer Remanenz von wenigstens 1,3 T sehr präzise gefertigt werden und magneto-optische $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ -Kristalle guter optischer Qualität für den Einsatz als Faraday-Rotator verfügbar sein. Das stöchiometrische Verhältnis von $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ legt den Wellenlängenbereich fest, in dem die optischen Isolatoren eingesetzt werden können. Kristalle mit hohem Mn-Anteil sind hierbei für die kürzeren Wellenlängen geeignet.

Messungen und Simulationen haben gezeigt, dass sich mit $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ und dem verwendeten Magneten optische Isolatoren realisieren lassen, bei denen im Wellenlängenbereich von 730 – 810 nm die optischen Verluste im Kristall weniger als 20 % betragen. Gleichzeitig ist das Magnetfeld-design so gewählt, dass eine Dämpfung von drei Größenordnungen in Rückwärtsrichtung (Isolation) bei hoher Transmission in Vorwärtsrichtung erreichbar sein wird. Mit der Verfügbarkeit von verschiedenen stöchiometrischen Verhältnissen von $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ -Kristallen wird es möglich sein, die meisten mit III/V-Lasertechnologie direkt erreichbaren Wellenlängen abzudecken. Dies ermöglicht es, kompakte Module für unterschiedlichste Anwendungen zu realisieren.



Fig. 1. Optical frequency reference module developed within the IQSoC project.

Compact optical frequency reference for technology demonstration on nanosatellites

Optical frequency references (OFR) are among the key components of optical clocks, length metrology systems, and atomic quantum sensors. Operated in space, these technologies promise major improvements in next-generation satellite-based navigation, ranging, and earth observation, respectively.

However, such applications require OFRs that have passed space qualification processes and, ideally, have already shown successful operation in space. This impediment both demands major resources and stretches the time between technology development and social benefit. Small satellites have recently gained attention in and outside the space community. Reduction in cost and the possibility to realize short mission development times make this satellite class predestined for in-orbit demonstration of enabling technologies. Still, miniaturization of the devices is necessary and particularly challenging, as small satellites only offer a few liters of volume for the payloads.

In the IQSoC project (Integrated Quantum Sensors on CubeSats) a CubeSat-compatible OFR module was developed [1]. The module shown in Fig. 1 has a volume of 35 cm^3 and a relative frequency instability of 1.7×10^{-12} at 1 second averaging time and reaches 3.4×10^{-13} at 100 seconds averaging time. This makes it one of the most compact realizations of an optical frequency reference at this performance level. Light from a distributed feedback diode laser with 780 nm wavelength is used for spectroscopy of rubidium vapor, contained inside a glass cell. The Doppler-free absorption features of rubidium's D2-transition serve as the feedback signal to stabilize the laser's frequency. Laser and spectroscopy unit are typically modularized and separated in such systems [2], which enables independent development, but comes with higher volume due to the necessary interfaces. With this module, distributed feedback laser diode, rubidium vapor cell and detectors are integrated into one temperature-controlled and fiber-coupled package. For module

operation, a compact low-noise current driver and software for an FPGA-based control system were developed [3]. Together with a commercial temperature controller, a complete demonstrator fitting into a 1 U CubeSat frame could be assembled, shown in Fig. 2.

Current activities at the Joint Lab Integrated Quantum Sensors focus on further reduction of size, increased performance and autonomous operation of rubidium vapor cell-based OFRs. This includes systems based on the $5S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ transition at 420 nm [4] or on the $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ two-photon transition at 778 nm [5]. The potential of further integration using MEMS vapor cells is investigated. At the same time, OFRs are evaluated in terms of user-friendly stand-alone devices.

This work has been done in a collaboration between Humboldt-Universität zu Berlin and National University of Singapore, supported by the Berlin University Alliance. The micro-integration was realized at FBH. It was also supported by the German Space Agency DLR with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under grant numbers 50RK1971 (ROSC), 50WM2066 (OPTIMAL-QT) and 50RK1978 (QCHIP).

Fig. 2. Complete demonstrator system with necessary electronic subsystems inside a CubeSat-shaped box.

Optische Frequenzreferenzen sind Schlüsselkomponenten für optische Uhren, Laser-Abstandsmessungen und Quantensensoren auf Basis kalter Atome. Um sie für zukünftige Anwendungen im Weltraum zu qualifizieren, müssen sie technologisch weiterentwickelt werden. Dank kompakter, kostengünstiger Satellitenplattformen wie dem CubeSat können derartige Technologien im Weltraum nun schneller demonstriert werden. Dazu müssen die optischen Systeme jedoch stark miniaturisiert werden. Im Projekt „Integrated Quantum Sensors on CubeSats“ (IQSoC) wurde ein CubeSat-kompatibles optisches Frequenzreferenzmodul entwickelt. In das temperaturgeregelte, fasergekoppelte Gehäuse wurden eine Distributed-Feedback-Laserdiode, eine Rubidium-Gaszelle und Detektoren integriert. Das gesamte Modul hat ein Volumen von 35 cm^3 und eine relative Frequenzinstabilität von $1,7 \times 10^{-12}$ bei einer Sekunde Mittelungszeit und ein Minimum von $3,4 \times 10^{-13}$ bei 100 Sekunden Mittelungszeit. Es zählt damit zu den kompaktesten optischen Frequenzreferenzen auf diesem Leistungsniveau. Derzeit werden die zugehörigen Konzepte für geeignete Weltraummissionen evaluiert.

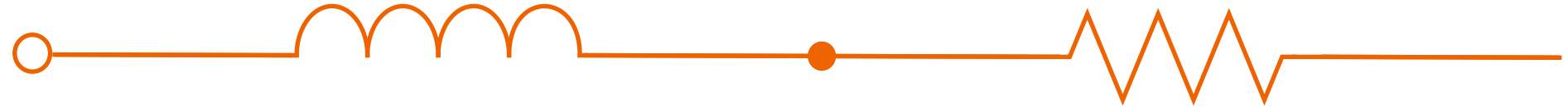


Publications

- [1] A. Strangfeld, S. Kanthak, M. Schiemanck, B. Wiegand, A. Wicht, A. Ling, M. Krutzik, "A Prototype of a Compact Rubidium-Based Optical Frequency Reference for Operation on Nanosatellites", *J. Opt. Soc. Am. B* 38, 1885-1891 (2021).
- [2] V. Schkolnik, O. Hellmig, A. Wenzlawski, J. Grosse, A. Kohfeldt, K. Döringshoff, A. Wicht, P. Windpassinger, K. Sengstock, C. Braxmaier, M. Krutzik, A. Peters, "A compact and robust diode laser system for atom interferometry on a sounding rocket", *Appl. Phys. B* 122, 217 (2016).
- [3] B. Wiegand, "Linien", GitHub, <https://github.com/hermitdemschoenenleben/linien> (2020).
- [4] C. Glaser, F. Karlewski, J. Kluge, J. Grimm, M. Kaiser, A. Günther, H. Hattermann, M. Krutzik, J. Fortágh, "Absolute frequency measurement of rubidium 5S-6P transitions", *Phys. Rev. Applied* 102, 012804 (2020).
- [5] K. Martin, G. Phelps, N. Lemke, M. Bigelow, B. Stuhl, M. Wojcik, M. Holt, I. Coddington, M. Bishop, J. Burke, "Compact Optical Atomic Clock Based on a Two-Photon Transition in Rubidium", *Phys. Rev. Applied* 9, 014019 (2018).

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, the institute offers new solutions to the steadily growing needs of wireless communications (5G, 6G, ...), radar sensing, and efficient power converters. All activities are based on III-V semiconductor technology; they presently encompass the following major topics:

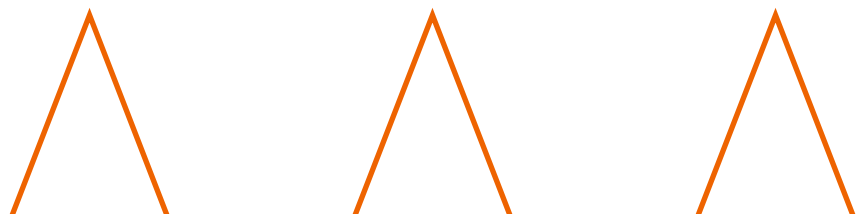
- > **Microwave power amplifiers based on GaN** for the use in base stations for mobile communications – the focus is on concepts improving energy efficiency (supply modulation/envelope tracking).
- > **Digital power amplifiers** – the FBH develops novel digital amplifier architectures for the wireless infrastructure. Long-term target is the complete digital transmitter.
- > **Terahertz components & systems** – the focus is on integrated circuits up to the 300 GHz band, using indium phosphide (InP) bipolar transistors (HBTs) and InP-on-BiCMOS wafer-scale hetero-integration. 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 the institute's 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 stellt das Institut neue Lösungen für die stetig steigenden Anforderungen in der drahtlosen Kommunikation (5G, 6G, ...), der Radarsensorik und bei effizienten Leistungswandlern bereit. 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 Mobilfunk-Basisstationen – der Schwerpunkt liegt auf Konzepten zur Verbesserung der Energieeffizienz (Versorgungsspannungsmodulation/Envelope Tracking).
- > **Digitale Leistungsverstärker** – das FBH entwickelt neue digitale Verstärkerarchitekturen für die drahtlose Infrastruktur, die Flexibilität mit Leistungseffizienz verbinden. Langfristiges Ziel ist der komplett digitale Transmitter.
- > **Terahertz-Komponenten & -Systeme** – der Schwerpunkt liegt auf integrierten Schaltungen mit Indiumphosphid (InP) Heterobipolartransistoren (HBTs), bis zum 300 GHz-Band und InP-auf-BiCMOS-Hetero-integration auf Waferebene. 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 bietet das Institut die für diese Forschungsarbeiten nötige Expertise bei Simulation, Modellierung, Schaltungsdesign und Charakterisierung.



A wideband multi-port measurement system for 5G-MIMO and space applications

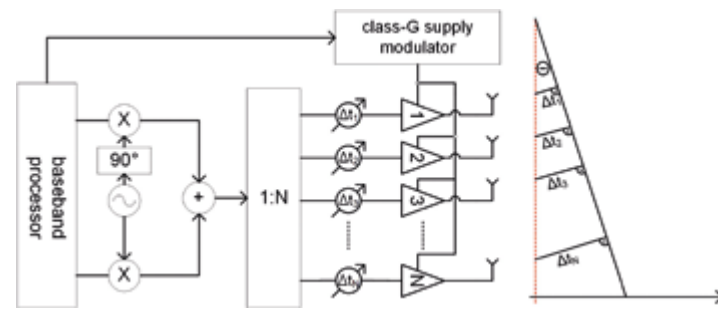


Fig. 1. System configuration of a multi-amplifier transmitter for MIMO with a single class-G supply modulator applied to multiple PAs [1].

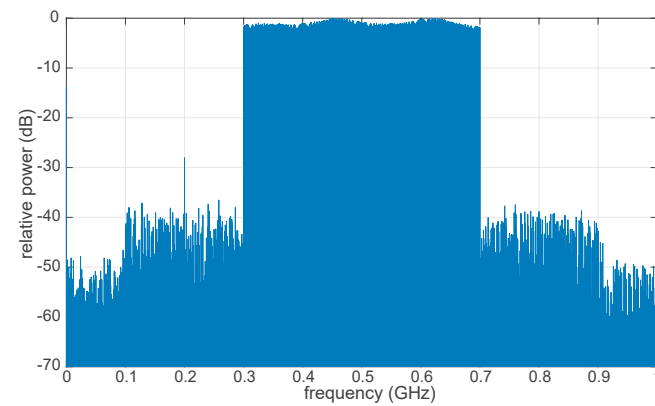


Fig. 2. Wideband signal captured at the down-converted IF output of the PNA-X system.

A 5G-MIMO measurement system for characterization of multiple input multiple output (MIMO) hardware for the 5th generation of telecom (5G) and space applications is now in place at FBH. It is designed to characterize the complex interactions and cross-modulations that can occur in integrated MIMO transmitters. This is where phase-delayed signals are transmitted over individual antennas and spatially combine to form a beam directed towards the receiver. A schematic of such a transmitter is shown in Fig. 1.

Due to poor isolation in the antenna path and the close distance between the amplifiers there are different forms of coupling between the branches in the transmitter. The reverse signal from the adjacent antenna interacts with the amplifier's own transmitted signal and causes reverse intermodulation, which affects the linearity of the system. Additional interactions may occur directly over the hardware by electrical RF coupling or thermally.

The presented measurement system was developed to characterize these effects at circuit level by emulating the operating conditions in the application in this system. In a first approach, controlled coherent wideband signals are injected at the in- and outputs of the transmitters in coaxial or coplanar probe-tip interfaces. Therefore, this system requires vector-calibrated reference planes where the incident and reflected signals are measured. The response of the amplifiers in form of power, efficiency and linearity are measured under different emulated beam conditions. This data can be used to directly quantify and compare designs but also to create non-linear models of the amplifier-coupling to linearize the whole system using digital pre-distortion. In a second phase, the system will be extended with over-the-air (OTA) capabilities for characterization of transmitters with integrated antennas. First tests are presently conducted on antenna arrays.

The system is developed to allow coherent characterization on 16 ports up to 67 GHz using signals with instantaneous bandwidths exceeding 2 GHz. The microwave down-conversion is conducted in 4-port Keysight PNA-X vector network analyzers. These PNA-X units are equipped with modified wideband mixers and wideband intermediate frequency (IF) outputs. They are also prepared for common local-oscillator operation.

A separate instrument rack contains the hardware for signal generation and IF or baseband conditioning, multiplexing and sampling. The wideband arbitrary waveform generators can generate complex modulated signals with an instantaneous bandwidth that exceeds 5 GHz on some channels. High speed 14-bit resolution digitizers enable sampling of IF signals in a similar range. Hence, the IF rack is fully equipped for all sub 5 GHz investigations. An example of a wideband multitone Schroeder signal used for IF calibration, captured over the wideband down-converted IF output, is shown in Fig. 2.

The measurement system includes a semi-automatic probe station where the OTA capabilities are incorporated and the device under test can be an integrated microwave amplifier on-wafer or a connectorized amplifier module.

This investment has been made possible through funding from the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within Research Fab Microelectronics Germany (FMD).

2020 wurde am FBH ein spezielles 5G-MIMO-Messsystem zur Charakterisierung von Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)-Hardware für 5G-Telekommunikations- und Raumfahrtanwendungen installiert. Das System ist auf die kohärente Charakterisierung an 16 Ports im Frequenzbereich bis 67 GHz ausgelegt. Signale mit einer Modulationsbandbreite von mehr als 2 GHz können dabei verarbeitet werden. Zum System gehört auch die Vektorkalibrierung der Schnittstelle zum Testobjekt – beispielsweise ein integrierter Mikrowellenverstärker auf dem Halbleiter-Wafer oder ein ganzes Verstärkermodul. Dank der herausragenden Eigenschaften ist das Messsystem ideal geeignet, um Komponenten mit mehreren integrierten Verstärkern zu charakterisieren. Auch komplexe Kreuzmodulationen, wie sie bei Komponenten von modernen Strahlformungsanwendungen in der Telekommunikation und im Weltraum auftreten, können so vermessen werden. Dieses Messsystem ermöglicht auch weitere Forschungen im Bereich von Breitband-Messtechniken. Im Jahr 2021 soll es zudem um eine Luftschnittstelle erweitert werden, die Over-the-Air (OTA)-Messungen für 3D-integrierte Antennen erlaubt.

Publication

[1] N. Wolff, W. Heinrich, O. Bengtsson, "Class-G Supply Modulation for MIMO and Radar with Phased Array Antennas," 12th German Microwave Conference (GeMIC), pp. 131-134, doi: 10.23919/GeMIC.2019.8698152 (2019).

The novel 5G-MIMO measurement system offers unique characterization capabilities.



Improved modeling of trapping effects in GaN HEMTs with a physics-based compact model

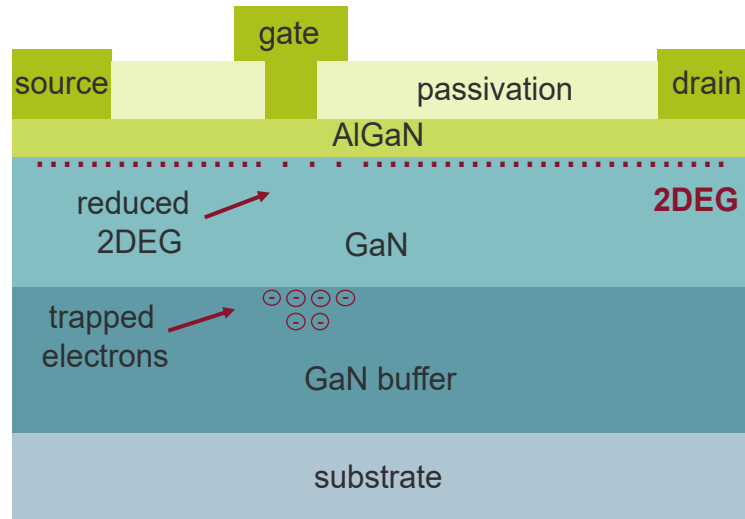


Fig. 1. Schematic of electron trapping in the buffer and the consequences for the two-dimensional electron gas (2DEG).

Nowadays, GaN HEMTs experience significant recognition in microwave applications that call for high power, low noise, and operation under extreme conditions. Circuit design for such applications requires highly accurate models to best represent the real device in an electronic design automation software. A well-developed compact model should provide high accuracy, good convergence properties, usefulness in circuit design, and preferably offer physical insight. Such capabilities allow bridging the gap between experiment and modeling of semiconductor devices and provide the basis for successful circuit design. At FBH, the physics-based standard model ASM-HEMT is used and has now been advanced within the joint activities with BTU Cottbus-Senftenberg.

Electron trapping (Fig. 1) is an unfavorable feature in semiconductor devices that obstructs real performance capabilities, creating effects that fall into two main categories: gate and drain lag. Serious progress in semiconductor surface passivation and treatment has significantly reduced gate lag. However, drain lag still hampers device performance and may cause deviations between simulations and measurements if not properly modeled. Thus, a novel drain-lag implementation for the ASM-HEMT

model has been developed, enhancing the modeling accuracy and improving the physical insight of the drain-lag mechanism.

Fig. 2 shows the circuit schematic with the ASM-HEMT surrounded by the extrinsic elements of the device. An R-C subcircuit with two R-C branches was implemented to emulate the two processes of capture and emission of electrons from a trap level. The Time constants of the two R-C branches were adjusted according to the characteristic time constants of the trap level in the device under test ($\tau_{\text{emission}} = R_{\text{emission}} \cdot C$ & $\tau_{\text{capture}} = R_{\text{capture}} \cdot C$). The R-C subcircuit can reproduce the transient response that the real trap exhibits when changes on the applied V_{ds} happen and yield the trap potential V_{trap} . Then, trap-affected model parameters are extracted, simulating iso-thermal and iso-trapping pulsed I-V measurements at various quiescent drain voltages V_{dsq} . This approach leads to a scaling drain-lag model that changes model parameters according to the trap potential V_{trap} . The focus is on trap-affected physical properties, good numerical convergence, and an efficient extraction procedure. This implementation reshapes the ASM-HEMT to cover the degraded device behavior created by drain lag without compromising modeling performance in circuit design.

Load-pull simulations help us understand the behavior and verify the performance of our models. Fig. 3 shows measured and simulated DC output current I_{ds} versus input power P_{in} at 8 GHz for class-AB biasing. The source and load impedances were adjusted for maximum output power. Fig. 4 presents measured and simulated power-added efficiency (PAE) and gain at the same frequency and bias conditions. In the figures, measurements (red dots) are compared with the simulation results of ASM-HEMT without any trap description (blue dashed lines) and with ASM-HEMT driven by the developed drain-lag model (solid black lines). The model omitting trapping effects shows its inability to predict real device behavior for the applied range of

input power. In contrast, the model with the drain-lag implementation shows simulation results identical to the measurements. Considering drain-lag effects therefore appears to be a determinative factor for accurate large-signal modeling of GaN-HEMTs.

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

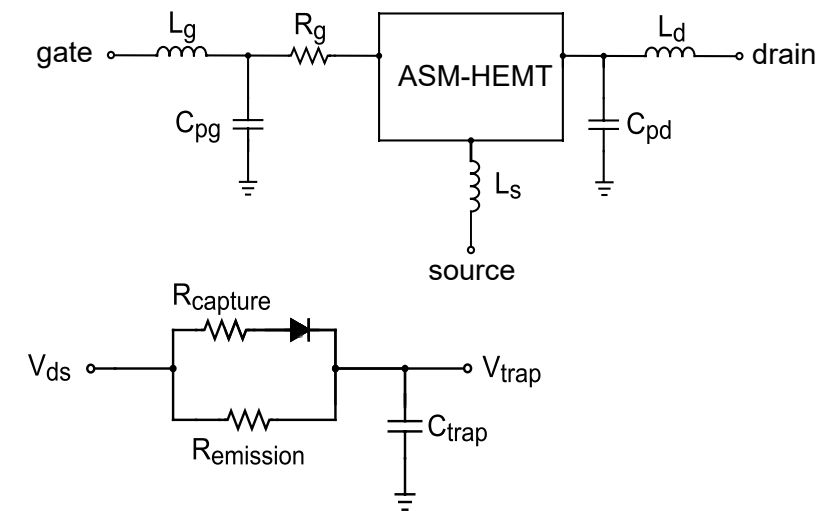


Fig. 2. Schematic of the model topology containing ASM-HEMT, extrinsic elements, and the drain-lag subcircuit.

GaN-HEMTs sind zentrale Bauelemente für Mikrowellenanwendungen im High-Performance-Bereich, die auf hohe Leistungen und geringes Rauschen abzielen. Um Schaltungen für Leistungsverstärker zu entwerfen, wie sie beispielsweise für 5G-Anwendungen erforderlich sind, werden hochgenaue Modelle benötigt. Als Bestandteil einer Schaltungs-Simulationssoftware können sie das Schaltungsverhalten präzise vorhersagen und analysieren. Des Weiteren muss das Modell gute numerische Eigenschaften bieten und vorzugsweise Einblicke in die Transistorphysik erlauben. Diese Merkmale vereint das physikalisch basierte ASM-HEMT-Modell, welches das FBH im Rahmen der gemeinsamen Aktivitäten mit der BTU Cottbus-Senftenberg nutzt und permanent weiterentwickelt. Die Partner haben dieses Modell kürzlich so erweitert, dass es die Dispersion deutlich besser beschreibt.

Publication

P. Beleniotis, F. Schnieder, M. Rudolph, "Simulating Drain Lag of GaN HEMTs with physics-based ASM model", 15th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Netherlands, pp. 165-168 (2021).

Fig. 4. Measured and simulated PAE and gain versus input power P_{in} at 8 GHz.

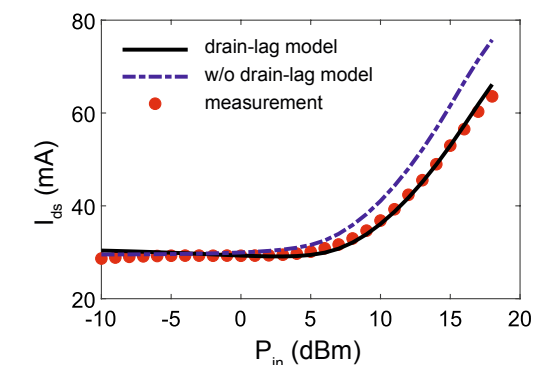
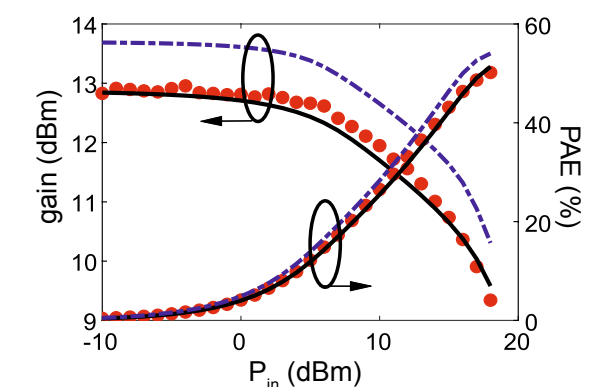


Fig. 3. Measured and simulated DC output current I_{ds} versus input power P_{in} at 8 GHz.



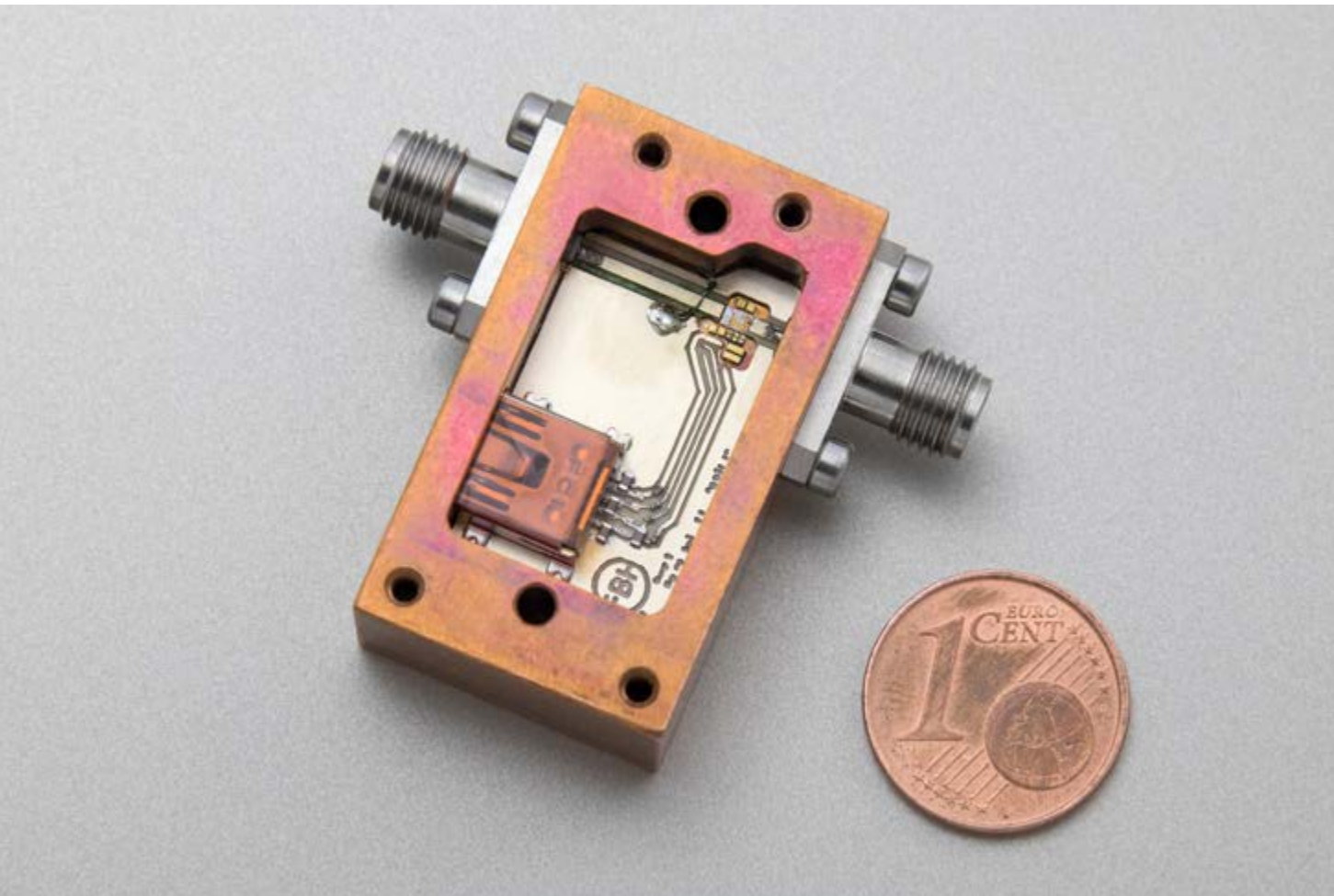


Fig. 1. Realized PSA module (w/o cover) including GaN PA MMIC and DC circuitry on a PCB; size: 20 x 35 x 15 mm³.

Filling the gap – potential shifting driver amplifier suited to complete digital GaN-based signal chains

Transistors operated in switching mode, i.e., only in on- or off-state, are becoming more and more the core elements in latest circuits for applications like power electronics or efficient microwave power amplification. Here, GaN technology offers solutions also at high switching speeds. For example, GaN-based high frequency DC/DC converters with monolithically integrated active components as well as the fully digital transmitter architecture for the future mobile infrastructure are extending the present limits of system performance. However, all the circuits are facing the same challenge: to properly drive the GaN-HEMTs.

In each of the systems mentioned above, a digital signal source like a pulse generator or modulator generates the pulse sequences for the digitally driven transistors. But these sources are

commonly realized in highly integrated logics with low breakdown voltages as provided by SiGe or BiCMOS technology and offer maximum $2 V_{pp}$ output voltage swing. As GaN-HEMTs typically require an input voltage swing of $5 V_{pp}$ to completely switch on ($V_{gs} = +1 V$) and off ($V_{gs} = -4 V$) a power (pre-) amplifier between signal source and GaN input is required. Moreover, DC-coupled, digital multi-stage GaN power amplifiers need a fixed DC potential at the input, independent of the modulation. This potential is adjustable, so GaN amplifiers of different topologies can be optimally driven.

In 2020, FBH has presented a novel GaN-based driver amplifier (PSA) module with included DC potential shifting. The compact module is suitable for properly driving GaN-HEMTs with digital

bit sequences in the microwave range. With it, a GaN-HEMT can be driven with $5 V_{pp}$ input swing from a standard $1 V_{pp}$ signal. The central element of the realized module (Fig. 1) is a GaN MMIC (Figs. 2 and 3) fabricated with the FBH 0.25 μm GaN-on-SiC HEMT process line. It has a size of 1.73 x 1.13 mm² and contains all active and most of the passive components. Together with a PCB circuitry to control the biasing it forms a compact module, exhibiting a volume of 20 x 35 x 15 mm³ only.

The potential shifting power amplifier provides a controllable potential shift (DC-offset) between -1.5 V to -10.9 V when referenced to ground (GND). A voltage gain of 10.7 and 4.9 with a load of 1 k Ω || 0.25 pF and 50 Ω is achieved, respectively. Input of the PSA is referred to GND with 50 Ω input impedance. The bandwidth is DC -3.2 GHz for a 3 dB voltage gain drop for both loads applied. Overall power consumption is 2.3 W. Applying a typical WCDMA modulated input bit sequence with 20 MHz modulation bandwidth and 6.5 dB peak-to-average power ratio (PAPR), the PSA exhibits an ACLR of 46 dB at the output without any correction.

The proposed PSA is an important building block to drive GaN-HEMTs in switch-mode with pulse input signals requiring $5 V_{pp}$ input amplitude and beyond. It bridges the gap between high-speed digital signal sources and the digital GaN part and is therefore essential to complete digital signal chains. Moreover, it can also be used as analog amplifier.

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

GaN-basierte Schalttransistoren sind Kernelemente in neuesten leistungselektronischen Anwendungen oder für die effiziente Mikrowellen-Leistungsverstärkung. Wegen zu geringer Spannungshübe können sie jedoch nicht direkt mit den sonst üblichen digitalen SiGe- oder BiCMOS-Pulsquellen betrieben werden. Zusätzlich zu $5 V_{pp}$ Amplitude benötigen DC-gekoppelte digitale und mehrstufige GaN-Leistungsverstärker ein festes DC-Bezugspotenzial am Eingang. Dieses ist einstellbar und so können GaN-Verstärker verschiedener Topologien optimal angesteuert werden.

Das FBH hat 2020 ein neuartiges GaN-basiertes Treiberverstärker-Modul mit integrierter DC-Potenzialverschiebung vorgestellt, das all diese Anforderungen erfüllt. Das zentrale Element des kompakten Moduls bildet ein GaN-Chip, der mit dem hauseigenen Prozess realisiert wurde. Der Verstärker zur Potenzialverschiebung liefert eine kontrollierbare Verschiebung zwischen -1.5 V und -11 V. Darüber hinaus wird an einer GaN-HEMT-typischen Eingangsimpedanz eine Spannungsverstärkung von 11 erreicht. Die 3 dB Bandbreite beträgt DC -3,2 GHz und der typische Leistungsverbrauch liegt bei 2,3 W.

Publication

T. Hoffmann, F. Hühn, S. Shevchenko, W. Heinrich, A. Wentzel, "Broadband Driver Amplifier with Voltage Offset for GaN-based Switching Pas", IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS), USA, pp. 273-276, doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223837 (2020).

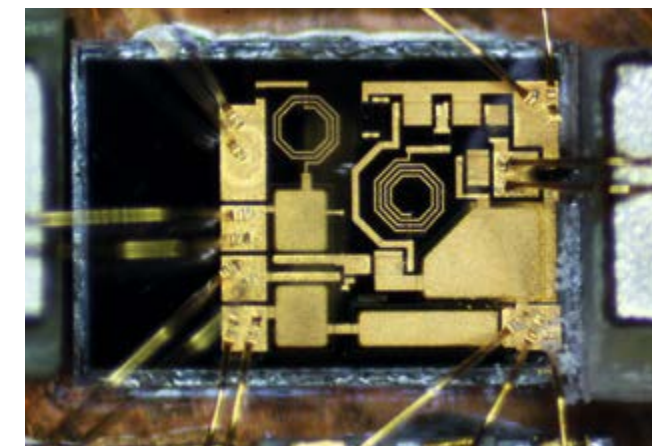


Fig. 2. Photograph of the fabricated GaN PSA MMIC; area: 1.73 x 1.13 mm².

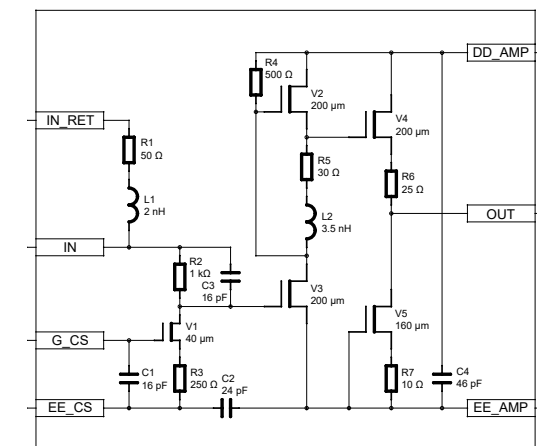
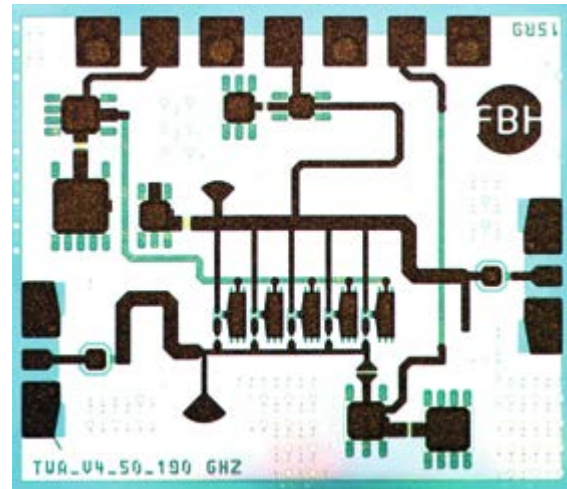


Fig. 3. Schematic of the developed potential shifting PA MMIC.

Broadband MMICs for applications at sub-THz frequencies



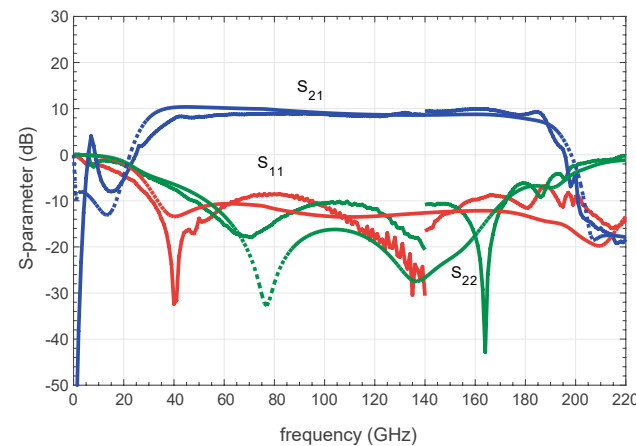
Chip photo of the distributed amplifier for D-band ($0.8 \times 0.75 \text{ mm}^2$).

Ultra-wideband amplifier for D-band

Ultra-wideband amplifiers are useful both in receiver and transmitter electronics aimed at communication, spectroscopy and measurement systems. The must-have properties of such amplifiers include high gain, linearity ($P_{1\text{dB}}$) and power-added-efficiency (PAE) along with low noise figure when used in the receiver side. To date, it has been a challenge to provide a technology that brings together all these performance characteristics. Using FBH's proprietary InP DHBT transferred substrate process, an amplifier with best-in-class performance has been developed. The in-house InP DHBT process can provide faster devices with higher power capabilities. Wideband characteristic is obtained by using a distributed topology with cascode arranged transistors. The measured circuit shows a bandwidth of 40 - 185 GHz with less than 8 dB noise figure in the frequency range 75 - 105 GHz and a 1 dB compression output power of $P_{1\text{dB}} > 8 \text{ dBm}$. Such amplifiers are ideally suited for the targeted applications both as InP DHBT-based MMICs or single packaged chips mounted on a host substrate [1, 2].

Key specs include

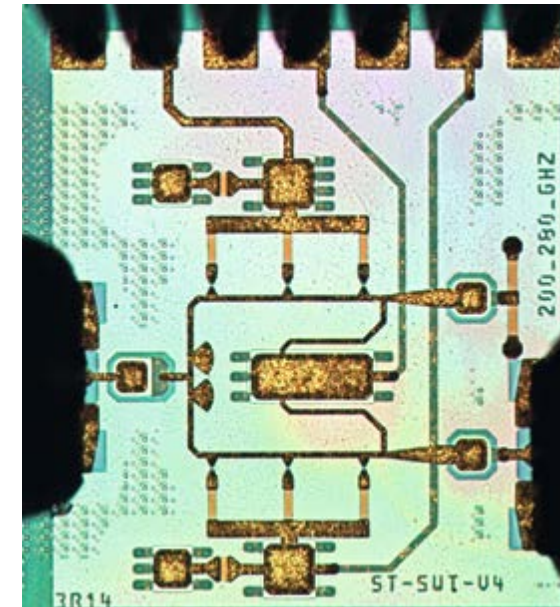
- Travelling wave amplifier with a bandwidth of $B_{3\text{dB}} > 145 \text{ GHz}$
- Saturated output power level of 10 dBm with $P_{1\text{dB}} = 8 \text{ dBm}$ and PAE = 11.2% at 160 GHz
- Noise figure of 8 dB, up to 110 GHz



Simulated (dotted) and measured (solid line) S-parameters.

Ultra-wideband single-pole double-throw (SPDT) switch

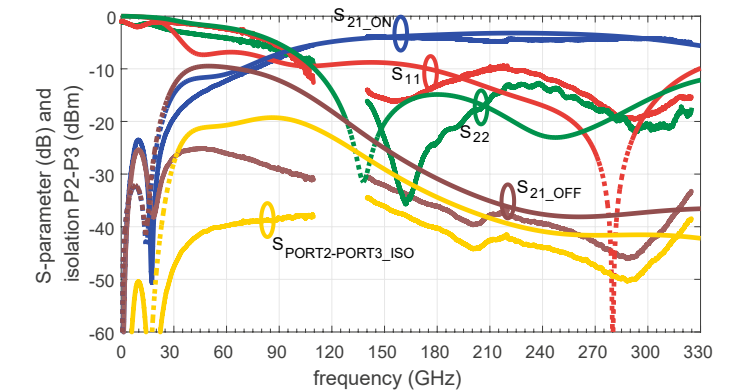
Sub-THz transceiver systems require signal switches to route RF signals towards the transmit or receive unit, respectively. A potential show stopper is the availability of wideband SPDT switches. They have to perform at multiple frequency bands (D-, G-, J-band, etc), especially for spectroscopy and measurement applications. Design and realization of such switches is challenging. Along with the bandwidth challenge, isolation between transmit and receive port, insertion loss between individual ports, and finally achieving high linearity are significant additional design challenges. There are very few technologies today that can meet these requirements. InP DHBTs from FBH's transferred substrate process with devices in the 800 nm node can potentially deliver all the specifications above. Thus, a corresponding ultra-wideband SPDT switch has been designed and realized. A bandwidth of $> 235 \text{ GHz}$ with operating range from 90 GHz to beyond 325 GHz was measured, with isolation values beyond 40 dB, and an insertion loss of 3 to 6 dBm within the measured frequency. Linearity measurements at 100 GHz yield an input referred $P_{\text{IN}1\text{dB}} > 16 \text{ dBm}$, which is close to the highest reported value for InP DHBT-based SPDT switches at this frequency. This is the widest bandwidth of an SPDT switch achieved in any MMIC technology. This ultra-wideband switch with its high input referred $P_{\text{IN}1\text{dB}}$ opens up new possibilities for multi-band mm-wave and THz spectroscopy, ultra-wideband



Chip photo of the SPDT switch ($800 \times 900 \mu\text{m}^2$).

radar systems and multiband measurement instruments [1, 2]. 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 within the EU projects ULTRA-WAVE and Teraway.

Ultra-breitbandige Verstärker und Schalter sind Schlüsselkomponenten für Sender- und Empfängermodule in Kommunikations-, Spektroskopie- und Messsystemen. Sie müssen insbesondere eine hohe lineare Leistung ($P_{1\text{dB}}$), einen hohen Wirkungsgrad (PAE) sowie eine niedrige Rauschzahl bieten. Mithilfe der am FBH entwickelten InP-DHBT-Technologie lassen sich alle diese Eigenschaften erstmals gleichzeitig erfüllen. Die zugehörigen MMIC-Schaltungen liefern Bandbreiten von 40 GHz bis 185 GHz und gleichzeitig eine Rauschzahl von weniger als 8 dB sowie eine lineare Ausgangsleistung $P_{1\text{dB}}$ von mehr als 8 dBm. Außerdem wurden SPDT-Schalter als MMIC mit einer Bandbreite von mehr als 235 GHz realisiert (90...325 GHz). Sie erreichen eine Isolation von 40 dB und eine maximale lineare Eingangsleistung $P_{\text{IN}1\text{dB}}$ von über 16 dBm. Diese Daten übertreffen klar den bisherigen Stand der Forschung.



Simulated (dotted line) and measured (solid lines) S parameters of the circuit (measurement data has a gap between 110 and 140 GHz due to frequency-band limitations of the equipment).

Publications

[1] T. Shivan, M. Hossain, D. Stoppel, N. Weimann, S. Schulz, R. Doerner, V. Krozer, W. Heinrich, "An Ultra-Broadband Low-Noise Distributed Amplifier in InP DHBT Technology," 48th European Microwave Conference (EuMC), Spain, pp. 1209-1212 (2018).

[2] T. Shivan, E. Kaule, M. Hossain, R. Doerner, T. Johansen, D. Stoppel, M. Rudolph, "Design and modeling of an ultra-wideband low-noise distributed amplifier in InP DHBT technology," Int. J. of Microwave and Wireless Technologies, 11(7), 635-644, doi:10.1017/S1759078719000515 (2019).

[3] T. Shivan; M. Hossain; R. Doerner; T. Johansen; K. Nosaeva; H. Yacoub; W. Heinrich; V. Krozer, "A High-Isolation and Highly Linear Super-Wideband SPDT Switch in InP DHBT Technology," 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Los Angeles, USA, pp. 1125-1128, doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223920 (2020).

[4] 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," 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Boston, USA, pp. 1011-1014, doi: 10.1109/MWSYM.2019.8700974 (2019).



Fig. 1. Single THz detector with electronics ready to use for customers.

Highest sensitivity – AlGaIn/GaN THz FET detectors compared to Schottky barrier diode detectors and photoconductive antennas

Within their joint activities, FBH and Goethe Universität Frankfurt am Main have advanced their AlGaIn/GaN HEMT THz FET detectors. They are now equipped with read-out electronics and integrated into a professional housing. Due to their high maturity level, the THz FET detectors can be tailored to customer needs and delivered as a single detector unit (Fig. 1) and as arrays with up to 144 THz detectors on a single chip (Fig. 2). These devices are ideally suited for spectroscopy, communications and imaging. In a recent work [1], the performance of these FET detectors (TeraFET) has been compared to that of Schottky barrier diode (SBD) detectors and photoconductive antennas (PCA) for spectroscopy applications – with competitive results in particular regarding their broadband capabilities.

The comparison was performed using a continuous wave measurement system based on 1.55 μm optical excitation. All detectors were incorporated on a hyperhemispherical silicon lens to focus the incoming terahertz radiation on the detector area. Fig. 3a illustrates that the SBD shows the strongest roll-off and drops to the noise floor at 350 GHz, while the AlGaIn/GaN THz FET detector and the PCA have a comparable detected signal level up to 2 THz. The THz power was measured with a calibrated pyroelectric power detector. The AlGaIn/GaN THz FET detectors exhibit a sensitivity of 283 V/W at 100 GHz and the highest conversion efficiency of all three detectors for frequencies below 500 GHz. The achieved signal-to-noise ratio is $\text{SNR} = 40 \text{ dB}$ with a noise-equivalent power of $26 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ [2]. Fig. 3b illustrates that the detector is capable of handling

modulated signals from DC to 2 GHz, which is compatible with communication systems. The THz emitter is operated at 100 GHz with amplitude modulation at the desired intermediate frequency (IF). The IF bandwidth in the current setup is limited by the bandwidth of the LNA. The measurements demonstrate the potential of the TeraFET to handle broadband modulated signals.

For the work on AlGaIn/GaN THz detectors presented in [2], an FBH team and its partners have received the 2021 THz Science and Tech. Best Paper Award of the IEEE Microwave Theory and Techniques Society (MTT-S). These detectors were realized as large area arrays with 144 individual THz detectors, as indicated in Fig. 2. They are the first step towards a fully integrated THz camera. The read-out from all elements employs proprietary techniques to speed-up the acquisition of signals from all elements.

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

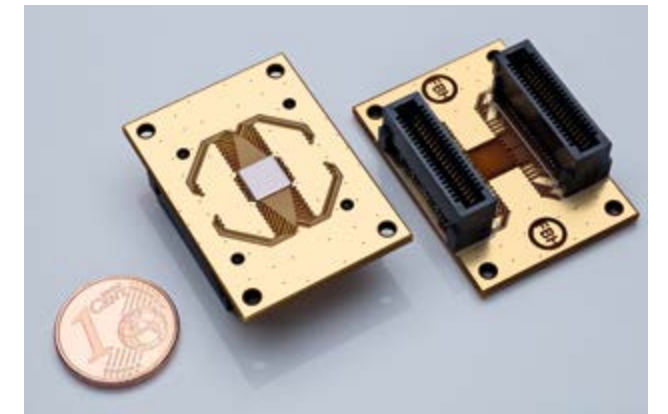
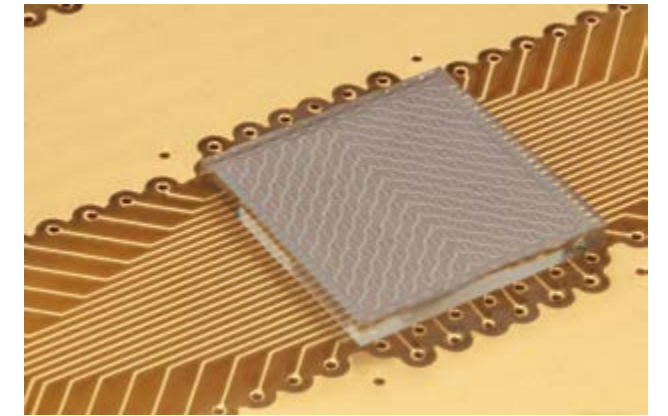


Fig. 2. Mounted 12 x 12 pixel focal plane array of bow-tie detectors.

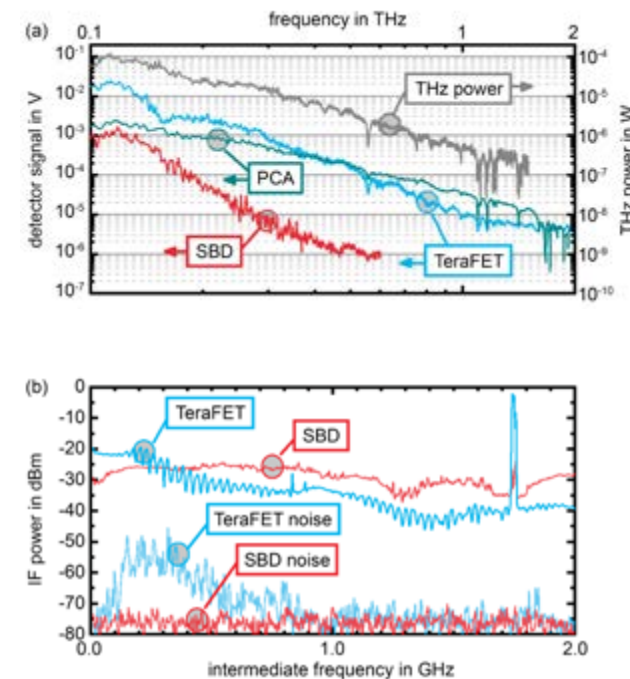


Fig. 3a) Spectra detected with SBD (red), PCA (cyan) and TeraFET (blue) from 100 GHz - 2 THz. b) IF power generated by TeraFET (blue) and SBD (red) measured from DC to 2 GHz.

Das FBH hat seine AlGaIn/GaN-HEMT THz-FET-Detektoren (TeraFET) erneut weiterentwickelt und die Detektoren zusammen mit der benötigten Ausleseelektronik in ein Gehäuse integriert. Mit dem kontinuierlich weiterentwickelten Prozess lassen sich – je nach Kundenwunsch – einzelne TeraFET oder Arrays mit bis zu 144 THz-Detektoren auf einem Chip vereinen. Die Sensitivität dieser TeraFET wurde kürzlich mit jener von Schottky-Dioden und fotoleitenden Antennen (PCA) verglichen. Dabei ist die Empfindlichkeit von TeraFET und PCA bis zu 2 THz vergleichbar und deutlich besser als jene von Schottky-Dioden. Die TeraFET zeigen eine Empfindlichkeit von 283 V/W bei 100 GHz und bieten die höchste Sensitivität für Frequenzen unterhalb 500 GHz. Sie erreichen ein Signal-Rausch-Verhältnis von $\text{SNR} = 40 \text{ dB}$ mit einer rauschäquivalenten Leistung von $26 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$. Zudem können die TeraFET modulierte Signale von DC bis 2 GHz detektieren, wie sie auch in Kommunikationssystemen verwendet werden.

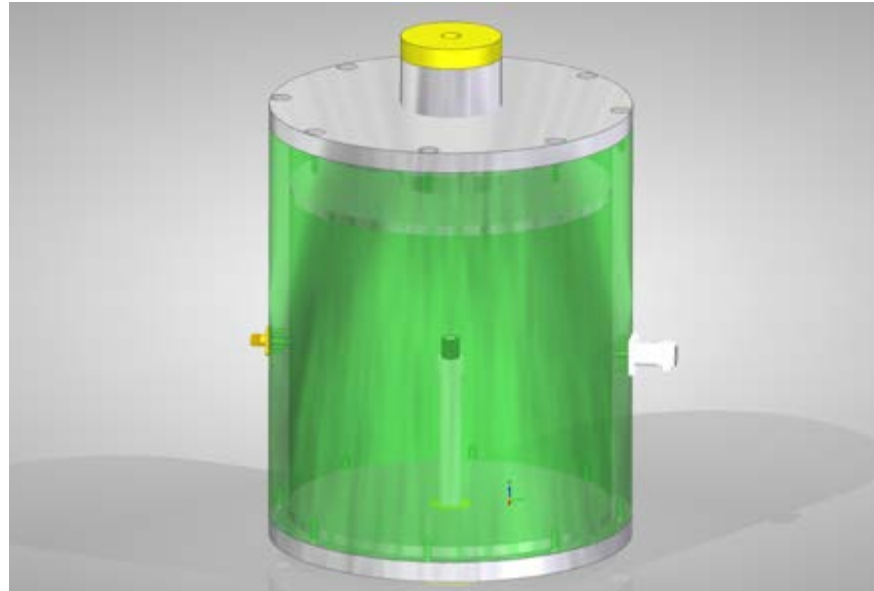
Publications

[1] S. Nellen, G. Schwanke, A. Rärer, L. Liebermeister, R. Kohlhaas, M. Deumer, E. Dischke, S. Shevchenko, W. Heinrich, V. Krozer, M. Schell, B. Globisch, "Comparison of Photoconductive Antenna, TeraFET and Schottky Barrier Diode as Detectors for Continuous-Wave Terahertz", Int. Conf. on IRMMW-THz (2020).

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

Novel plastic bending methods using microwave heating for industrial applications

➔ Fig. 1. Design of the measurement setup with a plastic sample (black) on the sample holder.



Plastic pipes with complex-shaped bends are required for various industrial applications, especially in the automotive industry. Such pipes are not restricted to cars equipped with classical combustion engines, but also needed in electric cars, e.g., for battery cooling. Conventional technologies use hot air or steam to heat plastics close to melting temperature and thus soften the material during the bending process. However, these methods are power hungry and not very energy efficient. Alternative methods use radio-frequency fields at 13.56 MHz to heat the pipes locally only at the bending locations, which is more efficient. Yet, energy absorption at 13.56 MHz is not sufficient for some materials and also highly dependent on the material temperature itself. The deformation process is therefore non-linear and difficult to control. This applies, for example, to polyphenylene sulfide (PPS), polyoxymethylene (POM), polyether ester (PEEST) and thermoplastic olefins (TPO). Using microwave frequencies opens up new opportunities in this regard.

In the framework of the ProFIT project KuBiMikE (Kunststoff-Biegeverfahren mit Mikrowellen-Erwärmung), the Ferdinand-Braun-Institut is developing a microwave-powered plastic pipe

bending system in cooperation with mobitec - Kottmann + Berger GmbH. The company from Baden-Württemberg has meanwhile established a branch in Berlin to implement this innovative concept.

The KuBiMikE project focusses on using microwave fields to heat up the plastics prior to the bending process. FBH characterization results of relevant materials show a significantly stronger and less temperature-dependent absorption of the field energy at 2.45 GHz compared to 13.56 MHz. As a first step, a measuring setup for microwave characterization of plastics at 2.45 GHz as a function of temperature has been designed and built (see Figs. 1 and 2). The design is based on correlated electromagnetic and thermal simulations. Heating of the plastic is contactless by means of microwave fields. In combination with a dedicated software driving the equipment, the temperature-dependent dielectric constant and the dielectric loss tangent of the plastics sample are determined. Fig. 3a shows the measured temperature-dependent frequency shift and the change in quality factor of a special resonance in the apparatus. These quantities are employed to extract the dielectric

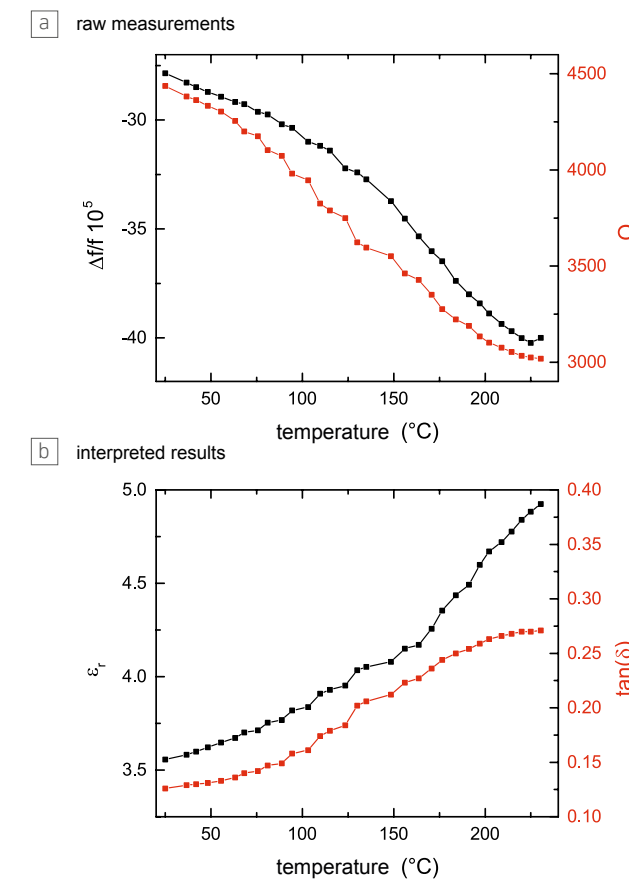
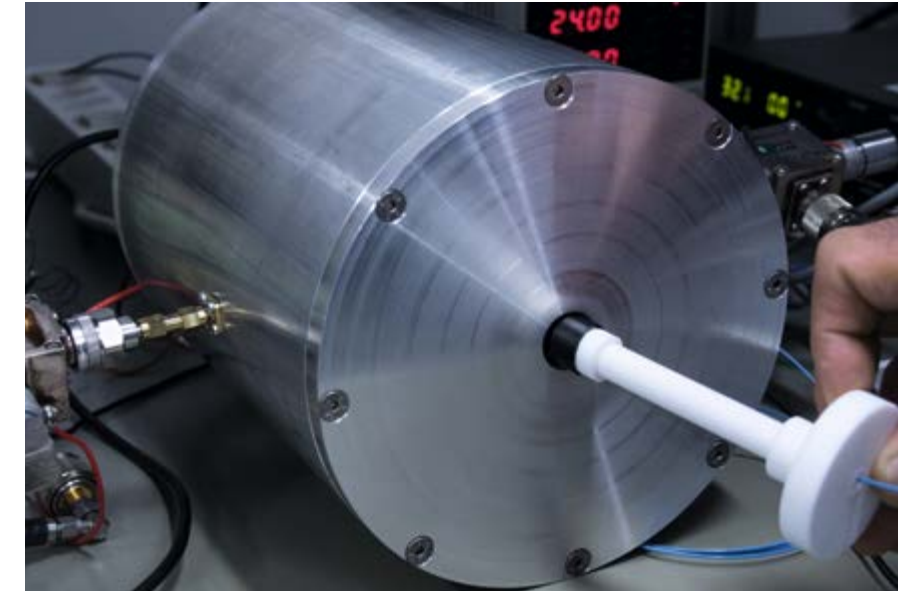
lectric constant and the dielectric loss tangent (see Fig. 3b) of a plastic sample placed in the measuring setup.

FBH in cooperation with mobitec is now focusing on the development of dedicated microwave resonators with a predefined geometry to concentrate the field in the bending cells. For this purpose, simulations of field and of temperature distribution

together with experimental investigations on the plastic heating are carried out. As the dielectric constant and the dielectric loss tangent of the plastic change with increasing temperature, the resonant frequencies of the resonator and the matching conditions change as well. The joint ProFIT project KuBiMikE is funded by Investitionsbank Berlin (IBB) through the European Fund for Regional Development.

➔ Fig. 2. Practical realization of the measurement setup.

➔ Fig. 3a). Shift of frequency and quality factor of a dedicated resonance in the measuring setup. These properties are used to determine b) the plastic dielectric constant and loss tangent.



Um Kunststoffteile wie etwa Rohrsysteme in der Automobilindustrie zu formen, muss das Material erhitzt werden. Das geschieht normalerweise mit heißer Luft oder Dampf. Dabei wird jedoch viel Energie verbraucht, weil der Kunststoff und die Anlage großflächig erwärmt werden. Erforderlich wäre dies jedoch nur an den Biegestellen. Daher sollen künftig Hochfrequenzfelder zum Einsatz kommen, die gezielt auf die relevanten Stellen fokussiert werden können. Die ersten Versuche wurden mit einer Frequenz von 13,56 MHz durchgeführt, für die kostengünstige Quellen mit hoher Leistung zur Verfügung stehen. Auch können die Anregungsstrukturen bei dieser Frequenz einfach gestaltet werden, weil die Wellenlänge wesentlich größer als die Dimension der Kunststoffteile ist. Es zeigte sich aber, dass hierbei die dielektrischen Verluste bei manchen der Materialien, die üblicherweise genutzt werden, für eine effiziente Erwärmung mittels Hochfrequenz zu gering sind. Da die Absorption mit der Frequenz steigt, zielen die Entwicklungen am FBH nun auf höhere Frequenzen im Mikrowellenbereich. Gemeinsam mit der Kottmann + Berger GmbH entwickelt das FBH eine geeignete mikrowellenbasierte Methode, die eine effiziente Erwärmung mit kompakten Strukturen erlaubt.

GaN-channel HEMTs with AlN buffer for high-voltage switching

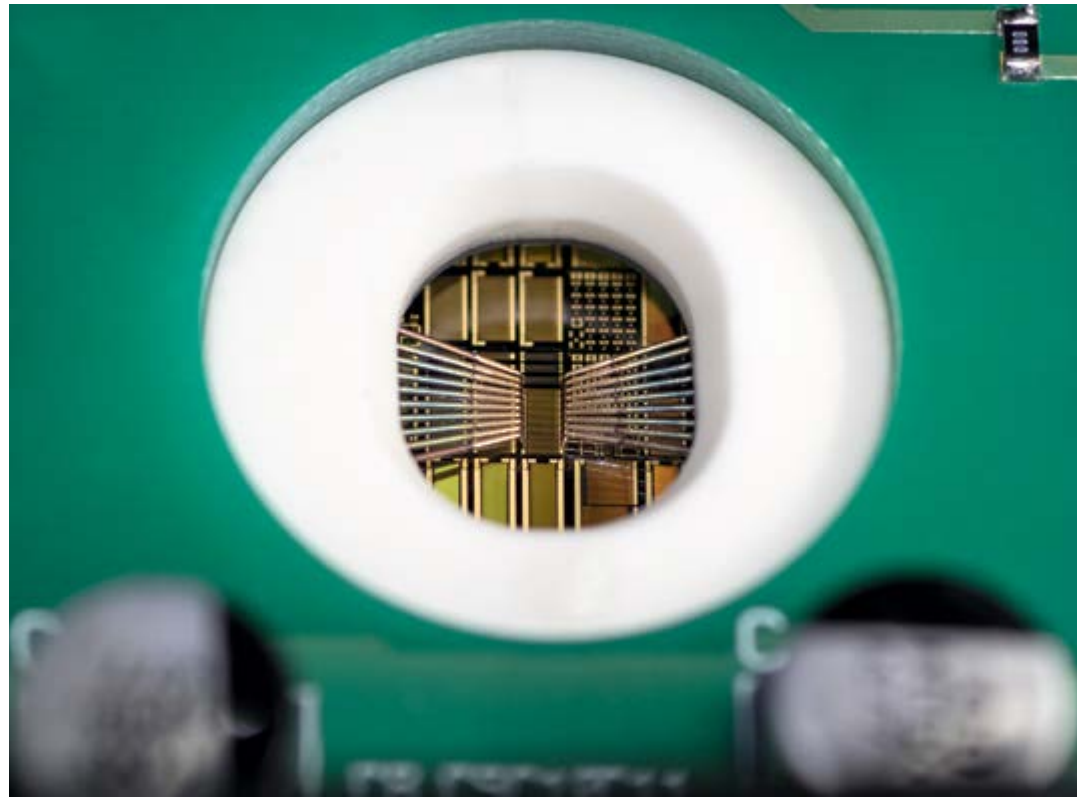


Fig. 1. 110 mΩ/1200 V AlN transistor structure contacted by a multi-needle probe card for on-wafer switching characterization.

Lateral GaN-based transistors (HEMTs) for power-electronic switching up to 650 V have not yet approached the theoretical GaN material limit in terms of achievable area-specific on-state resistance for a given breakdown voltage – unlike Si- and SiC-based devices. The inherent compromise between device breakdown strength and dispersion owing to the usually required GaN-buffer compensation doping is one of the reasons. Related dispersion effects should be absent when using the ultra-wide bandgap material AlN without any doping instead of GaN as buffer material. Further, the increased electron confinement in the GaN channel due to the AlN back barrier would result in a steeper breakdown voltage scaling with gate-drain distance than observed in conventional GaN HEMTs with a carbon-doped GaN buffer.

Power switches with 110 mΩ/1200 V rating were processed on MOCVD-grown AlGaIn/GaN/AlN-on-SiC epi wafers (Fig. 1). The observed 1790 V breakdown voltage and 3 mΩcm² area-specific on-state resistance result in a power figure-of-merit of 2.4 GW/cm². This is superior to conventional GaN device tech-

nologies using GaN-based buffer layers. Kilowatt-range power-switching functionality is demonstrated for the new AlN-based device by 950 V/10 A switching transients (Fig. 2).

Dispersion effects for high-voltage switching of the AlN-buffer devices differ from the characteristics in conventional GaN HEMTs. The dynamic R_{ON} increase after turn-on (Fig. 2) remains low up to off-state voltages $V_{OFF} = 250$ V due to the absence of any compensation doping, and only a very moderate R_{ON} increase is observed for $V_{OFF} > 500$ V. As an unexpected finding, an excessively increased dynamic R_{ON} was detected in a narrow voltage window at $V_{OFF} = 300 - 500$ V.

This observed excessive dynamic R_{ON} increase is considered as a signature of electron injection and trapping at the bottom of the GaN channel at the interface to the AlN buffer. There, the structural GaN layer quality is poor since the GaN growth is not lattice-matched to the AlN buffer underneath. While electron-trapping related dispersion effects usually increase with off-state voltage, the observed dynamic R_{ON} decrease above 400 V

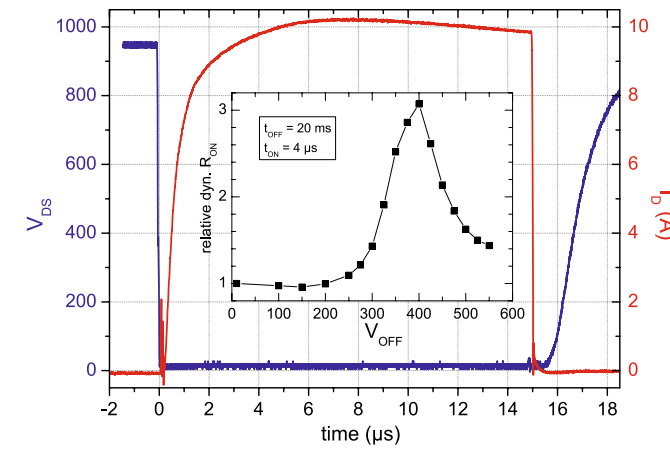


Fig. 2. 950 V/10 A switching transient of a 110 mΩ AlN transistor measured on-wafer. The inset shows the dynamic R_{ON} increase as function of the off-state voltage.

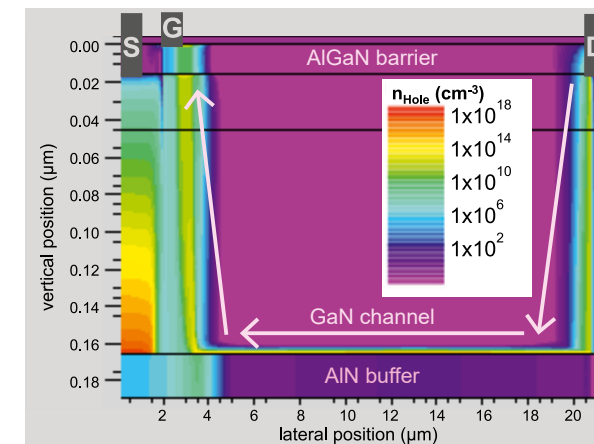


Fig. 3. TCAD-simulated hole concentration distribution for device off-state with $V_{OFF} = 1000$ V. The arrows indicate the hole flow from drain to gate/source along the GaN-channel/AlN-buffer interface.

is not known from conventional GaN HEMTs on insulating SiC substrates. A new electronic process has to be considered to understand this characteristic.

A new hole current path from drain to source has been identified at the bottom of the GaN channel for sufficiently high V_{OFF} by means of TCAD analysis of the AlGaIn/GaN/AlN device structure (Fig. 3). The holes are generated by impact ionization close to the drain due to the high electric field peaks there. They compensate or reduce the electrons trapped in material-defect related acceptor states, which are responsible for the excessive dynamic R_{ON} . The lateral hole current path is caused by the back barrier at the AlN buffer interface, which also acts for holes.

In summary, new AlGaIn/GaN/AlN HEMT devices showed particularly high breakdown strengths combined with low on-state resistances. A new hole current path at the bottom of the GaN channel was identified that is a direct consequence of the AlN-buffer/GaN-channel hetero junction. This hole current path

GaN-basierte Schalttransistoren für leistungselektronische Anwendungen haben die Materiallimits bezüglich des Einschaltwiderstands bei gegebener Sperrspannung noch nicht erreicht. Eine Ursache dafür liegt in der nötigen Kompensationsdopierung des GaN-Puffers und der dabei hervorgerufenen Dispersionseffekte beim Hochspannungsschalten. Das FBH entwickelt Transistoren, bei denen die GaN-Pufferschicht durch einen undotierten AlN-Puffer ersetzt wird. Dies führt zu einer höheren Sperrspannung bei gleichzeitig niedrigem Einschaltwiderstand. Zwischen 300 V und 500 V Sperrspannung wurde ein ungewöhnlich hoher dynamischer Einschaltwiderstand beobachtet, der bei höheren Spannungen wieder verschwand. Ursache dafür sind Elektronen im GaN-Kanal, die an der Grenze zum AlN-Puffer eingefangen wurden. Dort ist die strukturelle GaN-Materialqualität schlecht. Simulationen identifizierten bei höheren Sperrspannungen an dieser Grenzfläche einen Löcherstrom von Drain nach Source. Dieser kompensiert die eingefangenen Elektronen und reduziert so wieder den dynamischen Einschaltwiderstand für hohe Sperrspannungen > 500 V.

effectively eliminates the dynamic R_{ON} phenomena that are related to the GaN-channel trapping for switching voltages > 500 V.

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, J. Würfl, "GaN-channel HEMTs with AlN buffer for high-voltage switching", 79th Proceedings of the Device Research Conference (DRC), Columbus, USA (2021).

Lateral $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ power transistors for high voltage switching applications

The ultra-wide-bandgap semiconductor gallium oxide ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) has drawn considerable attention in recent years for next-generation power electronic applications. This can be attributed to its outstanding material properties. The bandgap of around 4.5 - 4.9 eV and the expected Baliga's figure of merit are promising indicators to pave the way for power devices with even higher breakdown voltages and efficiencies than their SiC and GaN counterparts. Current research activities using $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ are preferentially focusing on the development of Schottky barrier diodes and metal oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFETs). These devices have already demonstrated the high potential for high voltage applications, reaching a peak field strength as high as 5.5 MV/cm. However, investigations on switching performance and dynamic properties of such devices have been rarely reported up to now.

To analyze the switching properties of high-voltage $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ transistors, large periphery power MOSFETs with a total gate width of 10 mm were processed at FBH. They were dynamically characterized in close collaboration within the Joint Lab Power Electronics at Technische Universität Berlin. Device fabrication was carried out using i-line stepper lithography on

n-doped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ layers. They were homoepitaxially grown on semi-insulating $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) substrates with dimensions of $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ by metal-organic chemical vapor deposition. The large periphery multi-finger MOSFET devices feature a gate-to-drain distance L_{GD} of $6 \mu\text{m}$ at a gate-to-source separation L_{GS} of $1 \mu\text{m}$ as well as a gate length L_G of 700 nm . A fully processed switching transistor is shown in Fig.1a. In order to carry out switching experiments, the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ wafer was glued to a ceramic submount and electrically connected using wire bonding, which is seen in Fig.1b.

The measurement results for the static characterization using pulsed drain voltages at continuously biased gate voltages are presented in Fig. 2. For the first time, power MOSFETs based on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ were realized drawing absolute drain currents up to 2.5 A. Furthermore, an ON-resistance of around 4.6Ω was measured at low drain bias. A threshold voltage of -25 V was extracted from the transfer curve, reflecting a normally-on characteristic of the MOSFET devices.

In order to evaluate the high-voltage switching dynamics, double pulse tests were performed. Turn-on and turn-off switching

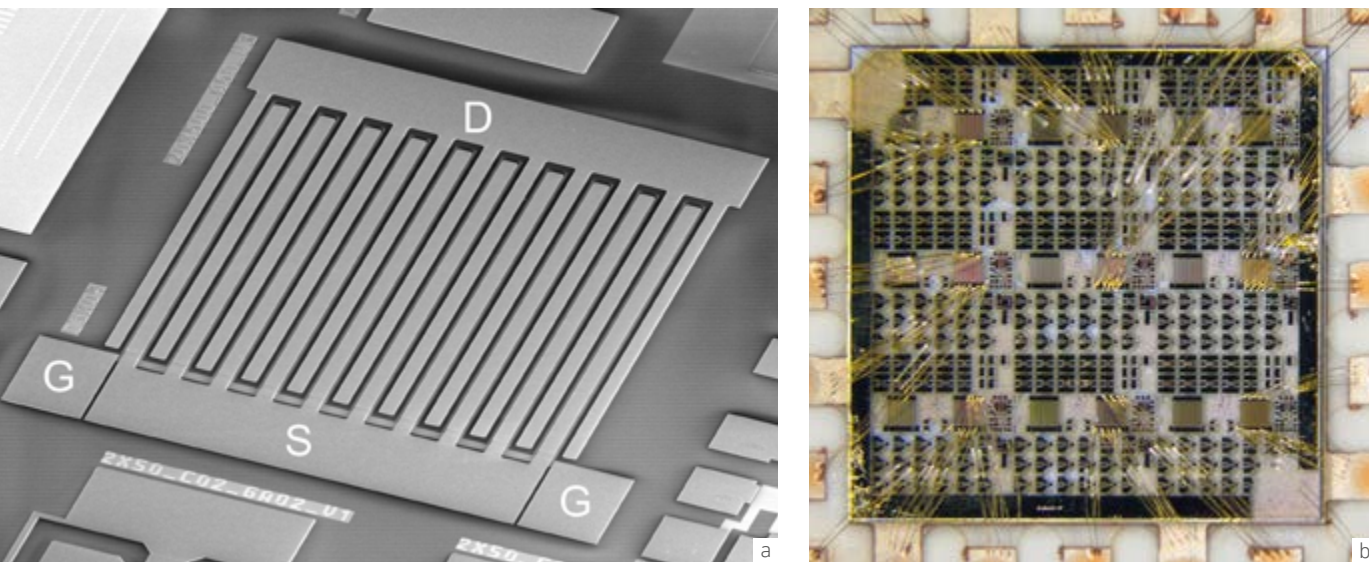


Fig. 1. Multi-finger $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ transistor with 10 mm total gate width (a) and a fully processed $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ wafer attached to a ceramic submount (b). The wire bonds provide electrical interconnections to the measurement setup.

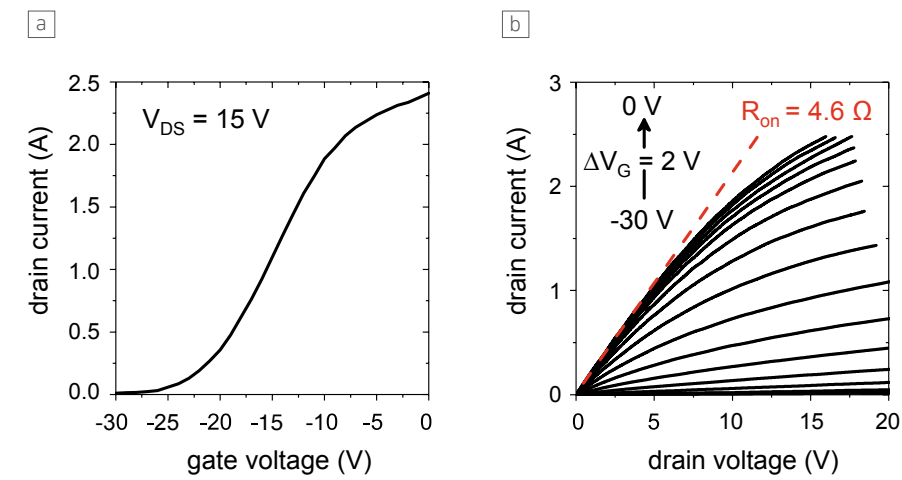


Fig. 2. Transfer (a) and output characteristics (b) of a $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ power transistor with 10 mm gate width using pulsed currents with $1 \mu\text{s}$ pulse length.

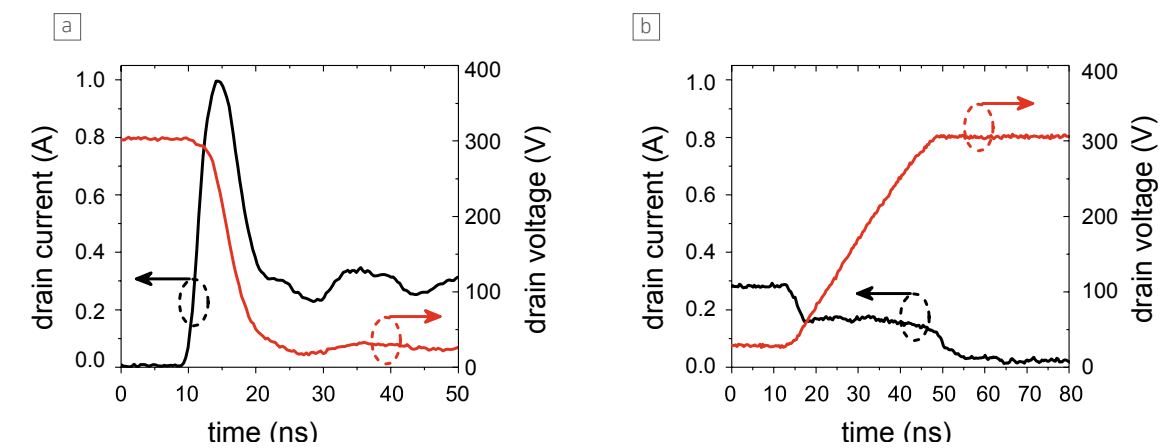


Fig. 3. Turn-on (a) and turn-off (b) switching waveforms of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ power transistors with voltage slopes up to 65 V/ns at a drain current and drain voltage of 300 mA and 300 V , respectively.

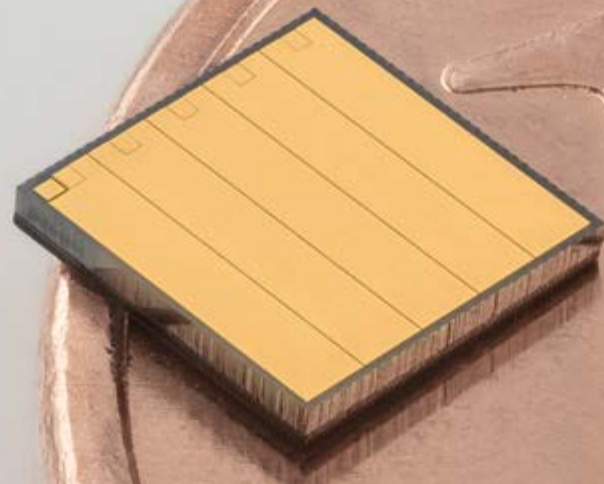
transients of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ power transistors are shown in Figs. 3a and b, respectively. The measurements were carried out at a drain current of 300 mA and a drain voltage of 300 V . The results indicate a stable and repeatable behavior. Moreover, fast switching of the devices with voltage slopes up to 65 V/ns during the turn-on phase is verified. This is a promising outcome of our investigations, emphasizing the high potential of this material for the realization of fast and highly-efficient power-switching devices of the next generation.

This work was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the frame of the joint research project OXIKON, funding no. 03VP03711.

Publication

J. Böcker, K. Tetzner, S. Heucke, O. Hilt, E. Bahat-Treidel, S. Dieckerhoff, J. Würfl, "Dispersion effects in on-state resistance of lateral Ga_2O_3 MOSFETs at 300 V switching", Electronics Letters 56, 838 (2020).

Galliumoxid ist ein Halbleitermaterial mit exzellenten Materialeigenschaften, das ein hohes Potenzial für leistungselektronische Systeme der nächsten Generation verspricht. Das verdankt es insbesondere seinem hohen Bandabstand von etwa $4,8 \text{ eV}$ und der damit zu erwartenden hohen Durchschlagsfestigkeit von 8 MV/cm . Weltweit wurden bereits vielversprechende Ergebnisse bei der Herstellung von hoch performanten Leistungsschalttransistoren auf der Basis von $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ erzielt. Jedoch gibt es wenig Untersuchungen und Erkenntnisse zu deren dynamischen Schalteigenschaften. Dem FBH ist es nun erstmals gelungen, große Schalttransistoren mit einer Gateweite von 10 mm zu prozessieren, die einen Rekordwert hinsichtlich des absoluten Stromes von bis zu $2,5 \text{ A}$ erzielen. In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin wurden zudem die dynamischen Eigenschaften im Betrieb bei einer Drainspannung von 300 V und einem Drainstrom von 300 mA untersucht. Dabei wurden schnelle und reproduzierbare Schaltvorgänge mit Schaltgeschwindigkeiten bis zu 65 V/ns gemessen – und so eine wesentliche Voraussetzung nachgewiesen, um künftig noch effizientere Leistungsschalttransistoren herzustellen.



Vertical GaN transistor 3 × 3 mm² chip for high current power switching.

Optimizations in vertical gallium nitride transistors for laser driving applications

Design and development of GaN-based vertical transistors for laser driving application are primarily concentrated on high current pulsed applications. High current density is achieved by very high transistor cell forward conductivity combined with highest cell integration density. Therefore, investigations are focused on two major levels: getting the most of the transistor intrinsic conductivity and increasing the integration scale level in terms of gate density per active chip area.

Conduction properties as function of the GaN substrate: Among GaN substrate growth methods hydride vapor phase epitaxy, HVPE, and ammonothermal growth are the most promising technologies. For comparing the on-state conductivity of *n*-channel trench MISFETs, a batch of five 2-inch highly conductive GaN substrates are investigated; three commercial HVPE from different vendors and two ammonothermal GaN substrates from a fourth vendor. A comparison of devices, grown and manufactured on different GaN substrates, shows significant differences of carrier transport properties in the respective transistors. Devices manufactured on the ammonothermal GaN substrates exhibit superior conductivity properties compared to all HVPE substrates. In addition, devices manufactured on some HVPE wafers own significantly better conduction properties than those from a competitive HVPE commercial source.

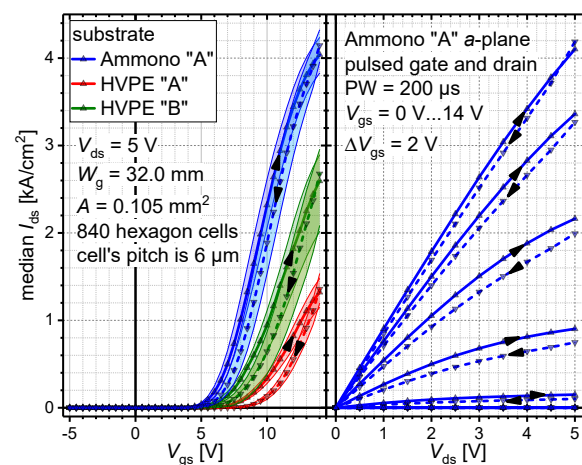


Fig. 1. Transfer characteristics of devices on different GaN wafers (left) and output characteristics of a device on an Ammono "A" wafer (right). For this comparison cellular hexagon, *a*-plane transistors are measured.

Conduction properties as function of gate trench orientation with respect to the GaN crystal plane: A substantial observation for all substrate types is that devices with a gate trench etched parallel to the nonpolar *a*-plane exhibit a higher drain current

and electron concentration in the inversion channel than devices oriented to the perpendicular *m*-plane. This observation stands in contradiction to recent reports on crystal-orientation dependent device characteristics and is due to the higher mobile charge carrier density in the channel, which results from the improved sidewall trench surface/interface quality. First of all, ammonothermal material as opposed to HVPE provides a much lower vertical dislocation density (about 3 orders of magnitude better). In addition, the reduced etch damage in trenches along the *a*-plane improves the gatetrench surface, as compared to the other studied devices.

Large scale integration for high current density: For integration scale level evaluation, devices with different gate width W_g and gate density per unit area were manufactured on the same wafer: 40.8 mm gate width interdigital layout 'finger'-type devices with a gate density of ~ 113 mm/mm² and a half cell pitch of 9 μ m as well as 32.0 mm gate width hexagonal cell design devices with ~ 305 mm/mm² gate density and a half cell pitch of 6 μ m. By increasing the gate areal density by a factor of 3 using the hexagonal design, the areal current density increases in a similar ratio.

As a result, GaN-based vertical *n*-channel trench MISFETs manufactured on ammonothermal GaN substrates with the gate trench etched along the *a*-plane crystal axis demonstrated superior conduction properties. In addition, large-scale integration with increased gate density is demonstrated. This work was supported by the European Fund for Regional Development (ERDF) in the frame of the German – Polish project "Pioneer-GaN" ref. 10157776 and partly funded by the German BMBF within the "Research Fab Microelectronics Germany (FMD)" framework under ref. 16FMD02.

Lasertreiber für LiDAR-Anwendungen setzen auf schnelle Hochstrompulsler, die möglichst induktivitätsarm aufgebaut sind. Eine sehr attraktive Lösungsmöglichkeit bieten vertikale Galliumnitrid-Transistoren kombiniert mit einer Chip-auf-Chip-Heterointegration des Laserchips. Bei der Optimierung des Vertikalbauelements zielt das FBH auf eine Erhöhung der intrinsischen Leitfähigkeit des Transistors und auf eine möglichst platzsparende, hochintegrierte Anordnung der einzelnen Transistorzellen. Dazu wurden Bauelemente auf verschiedenen Substraten hergestellt und ihre Eigenschaften verglichen. Transistoren, die auf ammonothermalen GaN-Substraten hergestellt wurden, punkten dabei im Vergleich zu Bauelementen auf HVPE-Substraten mit einer überlegenen elektrischen Leitfähigkeit. Für alle Substrattypen gilt: Bauelemente mit parallel zur unpolaren *a*-Ebene geätzten Gategräben zeigen einen höheren Drainstrom und eine höhere Elektronenkonzentration im Inversionskanal als Bauelemente, die zur dazu senkrechten *m*-Ebene orientiert sind. Mit einem hexa-

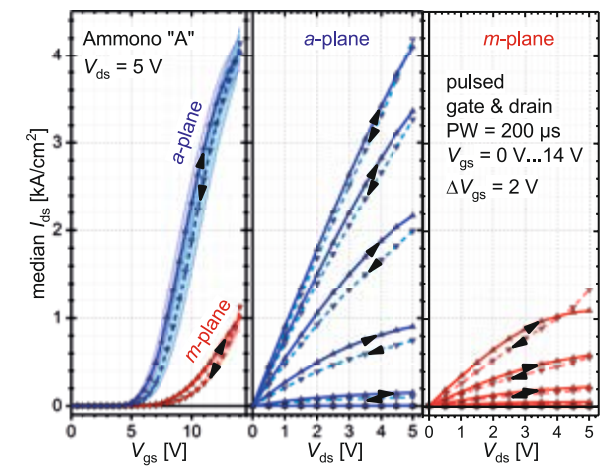


Fig. 2. Transfer and output characteristics of the different gate trench orientation devices on an Ammono "A" wafer. For this comparison cellular hexagon transistors are measured.

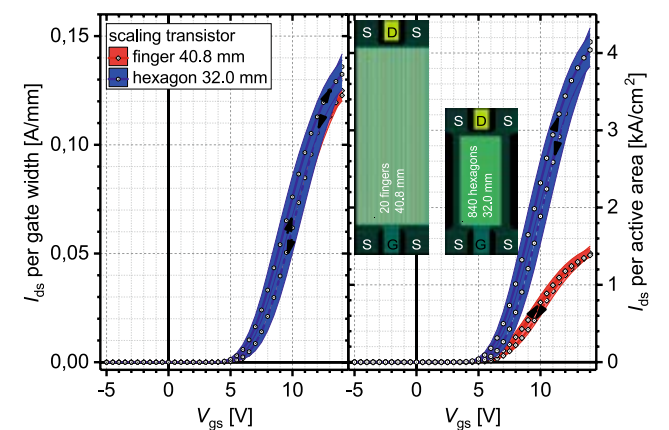


Fig. 3. Transfer characteristics of different devices with increasing active area, size and density on an Ammono "A" wafer; normalized current to the device gate width and normalized current to the device active area size.

gonalen Design lässt sich zudem die Gate-Flächendichte gegenüber dem konventionellen Fingerdesign deutlich erhöhen, analog dazu steigt auch die Flächenstromdichte auf bis zu 4 kA/cm².

Publications

E. Bahat Treidel, O. Hilt, V. Hoffmann, F. Brunner, N. Bickel, A. Thies, K. Tetzner, H. Gargouri, C. Huber, K. Donimirski, J. Würfl, "On the Conduction Properties of Vertical GaN *n*-Channel Trench MISFETs," IEEE J. Electron Devices Soc., vol. 9, pp. 215-228, doi: 10.1109/JEDS.2021.3056697 (2021).

E. Bahat Treidel, O. Hilt, V. Hoffmann, F. Brunner, B. Janke, N. Bickel, H. Yazdani, H. Gargouri, J. Würfl, "The influence of the GaN substrate types and active area scaling design on the conduction properties of vertical GaN MISFETs for laser driving applications," Int. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS MANTECH), USA, pp. 229-232 (2020).

E. Bahat Treidel, O. Hilt, H. Christopher, A. Klehr, A. Ginolas, A. Liero, J. Würfl, "The influence of the gate trench orientation to the crystal plane on the conduction properties of vertical GaN MISFETs for laser driving applications," Device Research Conference (DRC), USA, pp. 1-2, doi: 10.1109/DRC50226.2020.9135182 (2020).

E. Bahat Treidel, H. Christopher, O. Hilt, A. Klehr, A. Ginolas, A. Liero, J. Würfl, "Vertical GaN MISFET for chip on chip high speed laser driving applications," in Electronics Letters, vol.56, no. 20, pp. 1084-1086, doi: 10.1049/el.2020.0896 (2020).

III-V Technology

III/V-Technologie

The research area III-V technology combines 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, HVPE growth processes for AlN templates are developed.
- > **Epitaxy arsenides** – heterostructures for GaAs laser diodes over the whole wavelength range from 630 nm – 1200 nm for device development at FBH as well as for external customers. Also, SAM structures for pulsed laser systems are fabricated.
- > **Materials analytics** – supports the development of epitaxial growth processes by characterization of heterostructures. These analysis techniques are also utilized for the development of processing and mounting steps as well as for the analysis of root causes for device failure.

- > **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. These are carried out on the 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, and are constantly being further developed.

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

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 bündelt das FBH sein Know-how und seine 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 wird an HVPE-Prozessen für AlN-Templates geforscht.
- > **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.
- > **Materialanalytik** – unterstützt die Entwicklungen in der Epitaxie durch Charakterisierung der Eigenschaften der Halbleiterstrukturen. Diese Kompetenzen werden auch für die Entwicklung von Prozess- und Montageschritten sowie für die Analyse von Ausfallursachen der entwickelten Bauelemente eingesetzt.

- > **Prozesstechnologie** – Prozesse für eine Vielzahl von Bauelementen auf Basis von GaAs, InP und GaN sowie auf den neuartigen Materialien Diamant, AlN und Ga₂O₃. Diese werden auf der industriekompatiblen und zugleich flexiblen Prozesslinie auf Waferdurchmessern von 2" bis 4" wie auch auf kleineren Proben und Waferteilstücken durchgeführt und beständig weiterentwickelt.
- > **Aufbau-und Verbindungstechnik** – die Bauelemente werden auf Wärmesenken oder in Gehäuse – bei Bedarf hermetisch verschlossen – aufgebaut und damit für den Aufbau von Modulen und Systemen nutzbar gemacht.

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.

Increased emission power of ultra-violet light-emitting diodes by nanopatterned sapphire substrates

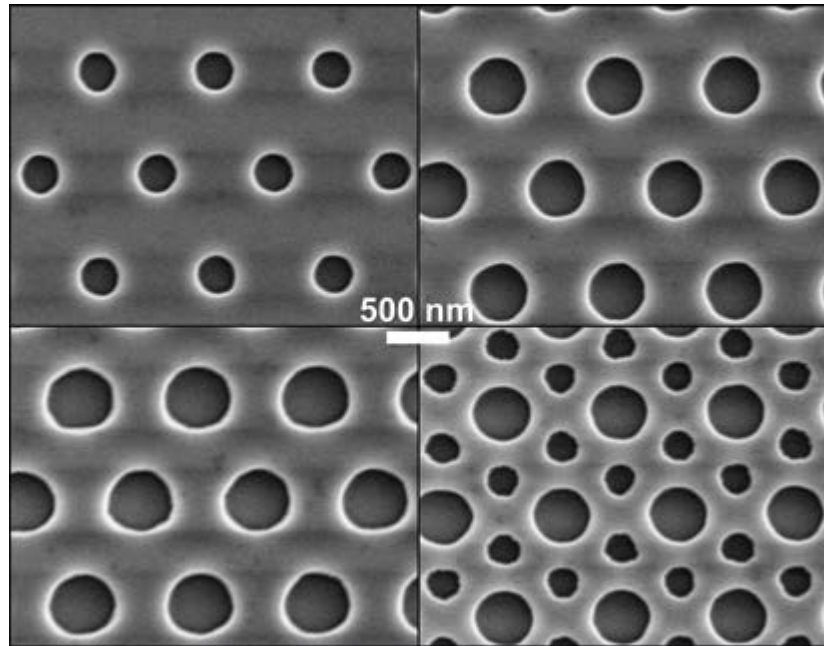


Fig. 1. Nanopatterned sapphire substrates with different nanohole patterns.

Facing the corona pandemic in 2020, global interest for the field of disinfection has strongly increased. An elegant way to disinfect, for instance, surfaces is to expose them to ultraviolet-C (UVC) light generated by UV light-emitting diodes (LEDs). The inactivation of the coronavirus using UVC LEDs has already been demonstrated by several research groups. This fact currently boosts the research interest in improving emission power, efficiency and reliability of these devices.

The light is generated in the active region of the LED and usually extracted through the sapphire substrate on which the LED structure is grown by chemical vapor deposition. One of the main obstacles is that a big portion of the generated light is trapped inside the UVC LED structure itself which reduces the emission power. Due to the different optical properties of the aluminum nitride (AlN)-based LED structure and the sapphire substrate, total internal reflection occurs for most of the generated light at the AlN/sapphire interface. A promising technique to overcome this problem is to grow AlN on nanopatterned sapphire substrates, e.g., with nanoholes introduced into the sapphire (Fig. 1). The nanopattern enhances scattering at the AlN/sapphire interface. This reduces the overall total internal

reflection. However, regarding the overgrowth of nanoholes it is challenging to achieve an atomically smooth AlN surface which is necessary for further growth of the LED structure.

For this purpose, a 3-step growth process was developed. After growing a 300 nm starting layer by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) on top of the sapphire nanoholes, the layer was annealed at 1680 °C for 3 h in a high-temperature annealing oven. This step is necessary to mitigate the tensile strain usually observed while growing AlN on sapphire. Without annealing the tensile strain leads to macroscopic cracking of the layer before the nanoholes are fully overgrown. As a positive side effect, the material quality of the AlN starting layer is improved by the annealing step which reduces the density of threading dislocations. Subsequently, the layer is overgrown with AlN until the nanoholes are fully coalesced (Fig. 2). The 3-step growth process works very reliably so that the different nanohole patterns shown in Fig. 1 can be overgrown reproducibly.

Within the "Joint Lab GaN Optoelectronics" UV LEDs emitting at 265 nm were grown on top of AlN/sapphire substrates with a planar interface and a nanopatterned interface (Fig. 3) at the

Technical University of Berlin. For the UV LED on top of the nanopatterned sapphire substrate the emission power could be enhanced by 34 % at an operation current of 25 mA compared to the LED with planar AlN/sapphire interface. Considering similar material quality of the underlying AlN, the emission power improves due to enhanced light extraction through the nanopatterned AlN/sapphire interface.

This proof of concept for using nanopatterned sapphire substrates to increase the light extraction efficiency of UV LEDs is a valuable contribution on the way to improve UV LED technology.

This work was partially funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the Advanced UV for Life project consortium (Grant Number: 03ZZ0134B) and by the German Research Foundation (DFG) within the Collaborative Research Center "Semiconductor Nanophotonics" (CRC 787) (Grant Number: 43659573).

Im Zuge der Corona-Pandemie ist das Interesse am Thema Desinfektion stark gestiegen. Oberflächen können beispielsweise mit ultraviolettem-C Licht von Leuchtdioden (UVC-LEDs) bestrahlt und desinfiziert werden. Bei konventionellen UVC-LEDs kann ein großer Teil des Lichtes die LED-Struktur nicht verlassen, da es an inneren Grenzflächen total reflektiert wird. Um das Licht besser auszukoppeln, können nanostrukturierte Saphirsubstrate eingesetzt werden, da das Licht an der Strukturierung stärker gestreut wird und so die LED-Struktur einfacher verlassen kann. Beim Überwachsen solcher Substrate mit der AlN-Unterlage für die LED-Struktur führt die Bildung von tensiler Verspannung jedoch zu Rissen. Rissfreie und glatte Schichten lassen sich durch einen zusätzlichen Heizschritt erreichen, der die tensile Verspannung abbaut. Die Lichtausgangsleistung von UVC-LEDs auf nanostrukturierten Substraten kann so im Vergleich zu konventionellen Substraten um circa 30 % gesteigert werden.

Publications

S. Hagedorn, S. Walde, N. Susilo, C. Netzel, N. Tillner, R.-S. Unger, P. Manley, E. Ziffer, T. Wernicke, C. Becker, H.-J. Lugauer, M. Kneissl, M. Weyers, „Improving AlN Crystal Quality and Strain Management on Nanopatterned Sapphire Substrates by High-Temperature Annealing for UVC Light-Emitting Diodes“, Phys. Status Solidi (a) 217, 1900796 (2020).

P. Manley, S. Walde, S. Hagedorn, M. Hammerschmidt, S. Burger, C. Becker, „Nanopatterned sapphire substrates in deep UV-LEDs: is there an optical benefit?“, Opt. Express 28, 3619 (2020).

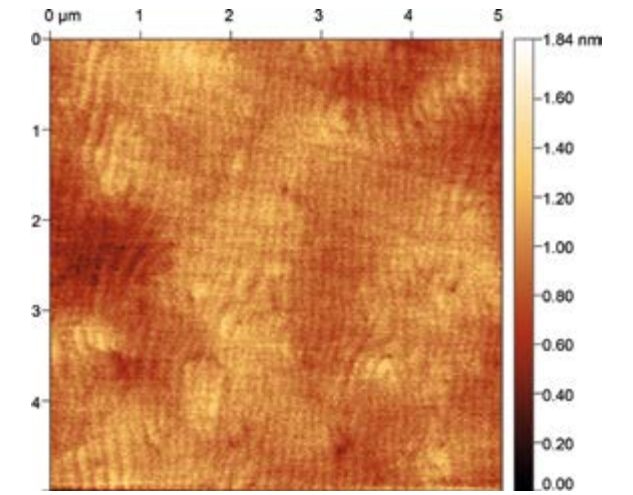


Fig. 2. Microscopic surface morphology measured by atomic force microscopy exemplarily shown for a nanohole patterned sapphire substrates successfully overgrown with fully coalesced aluminum nitride.

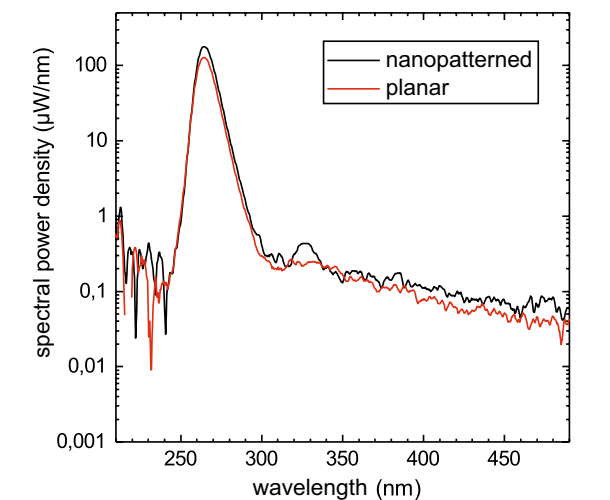
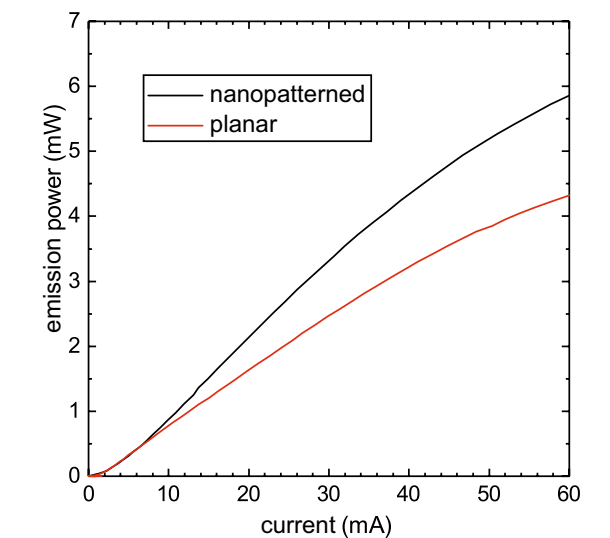


Fig. 3. Electroluminescence measurements of UV LEDs emitting at 265 nm on top of nanopatterned and planar sapphire substrates. Emission power against the current and emission spectra.

Structural and electronic properties of highly doped GaAs:Te layers for the use in stacked laser diodes

Tellurium (Te) as group VI element is an interesting n-type dopant for III-V compound semiconductors since it is not amphoteric like the group IV dopants silicon (Si) and germanium. In particular, it has been used to achieve highly doped n⁺⁺-type layers for tunnel junctions connecting different stages in multijunction solar-cells. The FBH has recently successfully fabricated GaAs:Te/GaAs:C tunnel junctions to connect multiple active regions in laser diodes. While the tunnel junctions in such devices are usually grown at low temperatures to allow for high Te and carbon (C) incorporation, subsequently grown AlGaAs layers with high aluminum (Al) content favor higher growth temperatures. Thus, the thermal stability of structural and electrical properties of GaAs:Te grown by metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE) has to be studied to allow for reliable application in devices.

GaAs:Te layers were grown in a 12x4" planetary MOVPE reactor (AIX2800G4) on exact (100) semi-insulating GaAs substrates from TMGa and AsH₃ using diethyl-tellurium (DETe) as dopant source. Growth was carried out at a low temperature (560 °C). In order to simulate the subsequent growth of AlGaAs layers at elevated temperature selected samples were annealed at 740 °C for 30 minutes under As-rich conditions in a separate process using the same reactor.

For as-grown samples Te concentrations [Te] between about $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ to $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ were determined by secondary ion mass spectrometry (SIMS, measured by



MOVPE reactor for growth of GaAs-based devices.

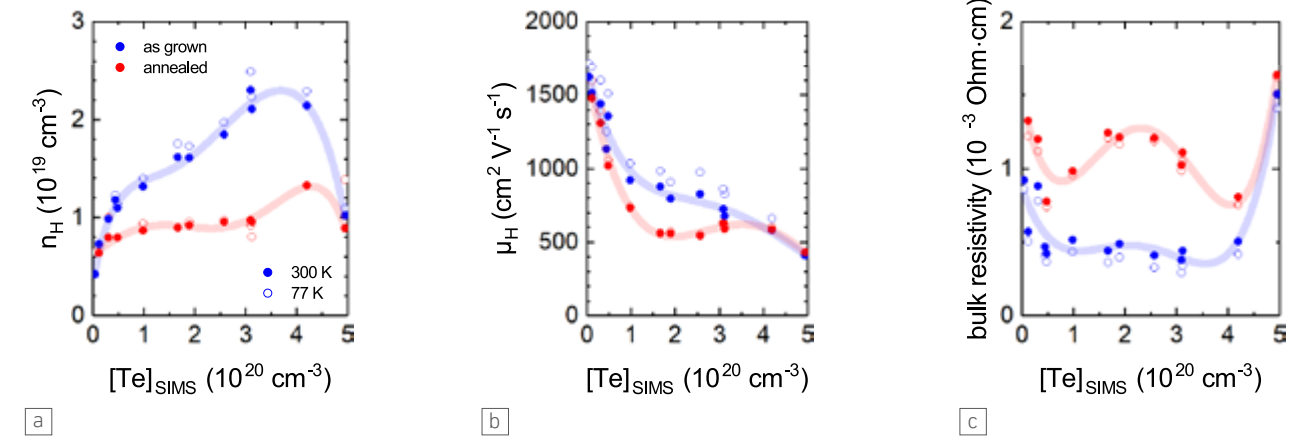


Fig 1. Hall data of as grown (blue) and annealed (red) GaAs:Te at 300 K (full symbols) and 77 K (open symbols). (a) free carrier concentration, (b) Hall mobility, and (c) bulk resistivity plotted against Te concentration determined by SIMS.

RTG Mikroanalyse GmbH). Furthermore, no significant diffusion of Te was observed in these samples. Room-temperature Hall measurements (fig. 1) for as-grown layers reveal an increasing free carrier concentration n_H with increasing [Te] until a limit is reached at about $2.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ for [Te] $\sim 3.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (activation $\sim 7\%$), and finally, a reduction of n_H sets in beyond this point. At the same time Hall mobilities μ_H gradually decrease from about $1600 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ to $400 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. The pronounced reduction in carrier activation is very likely due to the formation of acceptor-like species like the native point defect V_{Ga}^{3-} and a complex $(V_{\text{Ga}}-\text{Te}_{\text{As}})^{-}$. This is supported by X-ray diffraction (XRD) analysis carried out on the samples (not shown) revealing an increase of compressive strain with increasing [Te] remaining below the modeled strain induced by Te incorporated on As sites only. Consequently, the resulting bulk resistivity (fig. 1c) of the layers shows a broad minimum of roughly $4.5 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$ for Te concentrations between $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Upon annealing the bulk resistivity then increases by a factor of 2.5 due to corresponding reduction of n_H and μ_H in this region (red data in fig. 1) to $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $700 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, respectively.

In conclusion, tellurium thus offers higher maximum carrier concentration than possible with Si. Also, it does not show fast diffusion like Si when incorporated at levels above $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. However, thermal deactivation of the electrical performance during further growth has to be considered when designing growth processes including tunnel junctions with Te-doped n-side.

Um gestapelte III/V-Laserdioden mit Tunnelnioden zu realisieren, ist das Verständnis hochdotierter GaAs:Te-Schichten von zentraler Bedeutung. Am FBH wurden solche Schichten mittels MOVPE hergestellt und mit Blick auf die thermische Stabilität gegenüber einem nachfolgenden Hochtemperaturschritt untersucht. Strukturelle und elektrische Eigenschaften wurden anhand von Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS), Röntgenbeugungsanalyse (XRD) und Hall-Messungen analysiert. Dabei wurde zunächst ein Maximum der freien Ladungsträgerkonzentration n_H bei circa $2.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Aktivierung 7%) mit einer Ladungsträgerbeweglichkeit μ_H von etwa $700 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ nachgewiesen. Nach dem Annealing bei 740 °C waren n_H und μ_H zwar auf circa $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ beziehungsweise $600 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ reduziert, jedoch ist die Konzentration der Ladungsträger immer noch deutlich höher als es mit Silizium als Donator überhaupt möglich ist. Die thermische Deaktivierung muss jedoch beim Design von entsprechenden Wachstumsprozessen berücksichtigt werden.

Publication

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., vol. 57, no. 11, pp. 445-447, doi:10.1049/ell2.12162 (2021).



Fig. 1. FBH uses the MES to confirm recipes and track wafers in the process - parameters can be set and controlled at the workstations or using mobile devices.

Digitalization of cleanroom processes – introducing an MES in a research environment

Digitization and the Internet of Things (IoT) are currently revolutionizing processes in production halls and laboratories worldwide. With financial support from the European Commission in the framework of a project within the European Regional Development Funds, FBH is transferring its fabrication processes to a Manufacturing Execution System (MES). This step will also embed the institute into the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) and enable seamless processing across several institutes of the FMD – controlled completely digitally from the wafer to the component. With this complete digital data collection in the manufacturing chain product data can then easily be traced back to the exact component's fabrication, and its processes can be monitored and optimized. Since sources of error, e.g., transcription errors caused by manually recording process sequences on paper, are eliminated, speed, quality, and yield increase. Last but not least, customers who receive pilot series or individual products benefit from unprecedented

efficiency and quality – digitally documented from start to finish.

In 2020, FBH has installed an MES on its servers and conducted first virtual pilot processing runs. This digital exercise has been the first step towards real-world process execution. To align processes executed in the real world, a digital twin of reality has been modelled within the MES. This model is based on "master data", that include information on tangible objects such as available resources and associated recipes, but also the workflows and organizational structure. For example, master data encompass procedures such as maintenance activities, reporting and controlling frameworks, protocols enforced for quality insurance and many other aspects of high-tech processing.

Together with our FMD companions, we are enhancing our MES to meet our needs. In some cases, existing organizational

structures may need to be adjusted to follow best practices or become consistent with the business logic used in the software. In other cases, the software may need customization. In fact, it is a unique challenge to adapt a software commonly associated with highly standardized industrial productions to the specific needs of a research institute. The introduction of the MES will in some cases challenge long standing and cherished habits at FBH. This process may be perceived as disrupting and precisely for this reason provides a unique opportunity for optimization.

This demanding, yet extremely rewarding process has already enabled a standardized naming convention across several administrative groups of our institute. Currently, all resources of FBH's front- and backend, as well as an estimated 50 % of technological processing services with their respective recipes have been uploaded to the MES. This can be considered a major gating event to transfer process control and guidance to the system. Fig. 1 shows the MES in operation with a section of FBH's frontend capabilities visible on the monitor. For the first time, key-users may now model and implement their process flows in the MES, an example of which is depicted in Fig. 2. In 2021, the MES is expected to guide and record data of selected shop floor processes for the first time. This major and often long-awaited transition is accompanied by a sustained effort for an automated data collection that will provide the relevant process information. To this end, FBH has developed the IoT device iSensU to provide data connectivity to legacy tools and is upgrading newer tools to standard communication protocols

such as SECS-GEM. With a fully implemented MES guided processing, all data will be available at a click and the MES will become a valuable tool and supporting companion to FBH's staff on its road to further digitalization. The major part of the work was funded by the European Commission in the framework the European Regional Development Funds under the reference EFRE 1.8/17 (Berlin).

Das FBH will künftig, seine Fertigung von elektronischen und optoelektronischen Bauelementen umfassend digital steuern und überwachen. Dafür stellt es seine Produktionsprozesse mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Kommission auf ein Manufacturing Execution System (MES) um. Im Jahr 2020 haben wir die entsprechende Software auf unseren Servern installiert und erste virtuelle Pilotprozessierungen durchgeführt. Im Jahr 2021 soll das MES erstmals Daten ausgewählter Fertigungsprozesse führen und aufzeichnen. Die Daten werden möglichst automatisiert erfasst und liefern kontextbezogene Prozessinformationen – eine große und lang erwartete Umstellung. Ist das MES-System vollständig implementiert, werden alle Daten per Klick verfügbar sein. Es wird so zu einem wertvollen Werkzeug und unterstützenden Begleiter aller FBH-Mitarbeiter*innen. Das Projekt wird maßgeblich unterstützt durch eine Projektfinanzierung im Rahmen des EFRE-Programms der Europäischen Kommission.



Fig. 2. Gantt chart showing process flows of materials (symbolized by colored boxes) across various process resources (listed in left column). The MES computes various planning scenarios that optimize various performance indicators such as resource utilization, fastest overall production delivery, minimization of average processing time or deviation from delivery dates and many more.

Downsizing semiconductor chips – development of a highly precise soldering method using formic acid

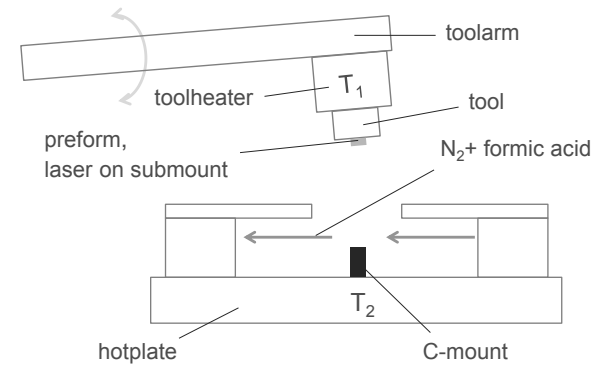


Fig. 1. Solder chamber (left) and a sketch of operating principle (right).

More and more functionality is being packed onto smaller sized chips. The high integration density requires a 3D assembling of semiconductor devices on a chip level while keeping the 2D footprint constant. Both, the downsizing in the 2D CMOS-based technology and additional functionality through e.g. MEMS components or optical chips require adjusting the mounting and assembly technology. In particular, optical components such as semiconductor laser diodes need to be “cleanly” assembled with a bonding technology free of flux remains that could possibly alter functionality or affect the performance. Another application for fluxless soldering is the integration of chips of different functionalities on a silicon wafer. Since the devices are progressing to shrink the connection pads are designed smaller in size and more densely arranged to each other. To avoid damages caused by flux remains, the conventional soldering using flux has to be replaced.

The mounting and assembly department at FBH has developed a solder process in which liquid fluxes or manually removing of oxides on the solder surface are replaced by applying of nitro-

gen/formic acid gas mixture. In an open chamber oxide is removed directly before soldering. In contrast to the established soldering methods we use an open chamber with a hole in the top lid. The tool, which is carrying the chip to be soldered, “dives” into the chamber. In the time the chip is moving down towards the pad on the base, the reducing formic acid/nitrogen gas is introduced inside the chamber (Fig. 1). With this approach we combine the micron-accurate adjustment with the oxide removing atmosphere required for stable and reliable bonding.

We started our tests after preliminary work to ensure that the bonds are mechanically stable by soldering of the RW-laser chips on submounts to C-mounts. Compared to the established method the manually removing of the oxide layer on the top of the solder is omitted. By shear tests after the soldering the strength and thus the applicability of the solder process was analyzed. For the tests only CuW-submounts were first soldered to the C-mounts. Submounts with different footprints (3 mm², 6 mm², and 12 mm²) and compatible C-mounts were used. In Fig. 2 the shear force depending on solder area for two

different solders Sn-Pb and Sn-Ag-Cu using formic acid/nitrogen gas mix is presented. The strengths of the joints were calculated from the linear curve fittings to (52.9±1.7) MPa for Sn-Pb and to (41.1±1.0) MPa for Sn-Ag-Cu solders, respectively. The calculated bond strengths are comparable with those reported in literature where flux was used in the soldering process.

After fabrication of the RW-laser devices using the newly developed solder method COD tests were performed. Fig. 3 shows the optical power vs. applied electrical current for two lasers assembled using the new method and for one laser using standard reference method. For the three curves the same characteristics are found. This indicates no functional changes compared to the reference. Currently we analyze the thermal resistance and perform long term aging test to validate the new solder method.

This work is supported through the ERDF project “Application Laboratory III-V Components for Laser Technology and Electronics”.

Das Department Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) am FBH hat ein Lötverfahren entwickelt, das ohne Flussmittel auskommt. Zudem müssen Oxidschichten auf den Lötflächen nicht mehr manuell entfernt werden. Dieser Ansatz kombiniert eine mikrometeregenaue Positionierung mit einer reduzierenden Atmosphäre: Voraussetzung für eine stabile und zuverlässige Verbindung (Abb. 1).

Um die Festigkeit und damit die Anwendbarkeit des Lötprozesses zu testen, wurden nach dem Löten Schertests durchgeführt. Abb. 2 zeigt die Scherkraft in Abhängigkeit von der Lötfläche für die zwei verschiedenen Lote Sn-Pb und Sn-Ag-Cu. Die berechneten Scherfestigkeiten sind vergleichbar mit den Angaben aus der Literatur, bei denen Flussmittel für den Lötprozess verwendet wurde.

In Abb. 3 ist die optische Leistung in Abhängigkeit vom angelegten Strom für drei RW-Laser dargestellt, die mit unterschiedlichen Loten und Lötmethoden aufgebaut wurden. Die drei Kurvenverläufe sind annähernd identisch und zeigen keine Verschlechterung gegenüber der Referenz. Derzeit analysieren wir den Wärmewiderstand und testen die Langzeitalterung, um die Lötmethode zu validieren.

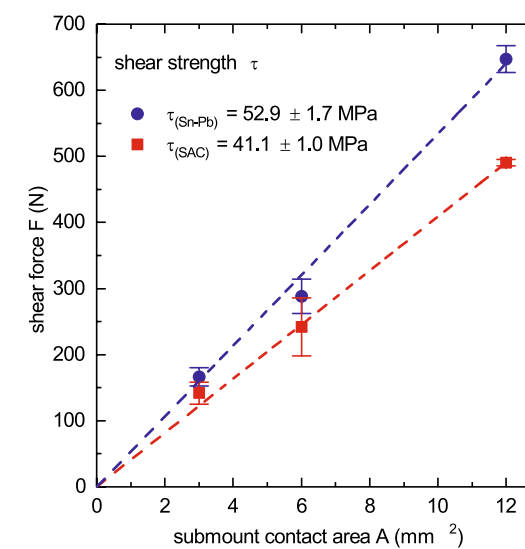


Fig. 2. Shear strength of bonds for different solders using formic acid/nitrogen gas mix.

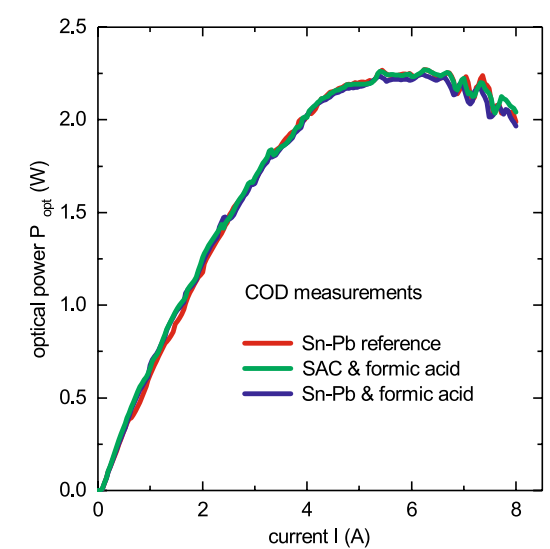


Fig. 3. COD measurements comparing the new solder method with reference for two different solders.



Annex Anhang

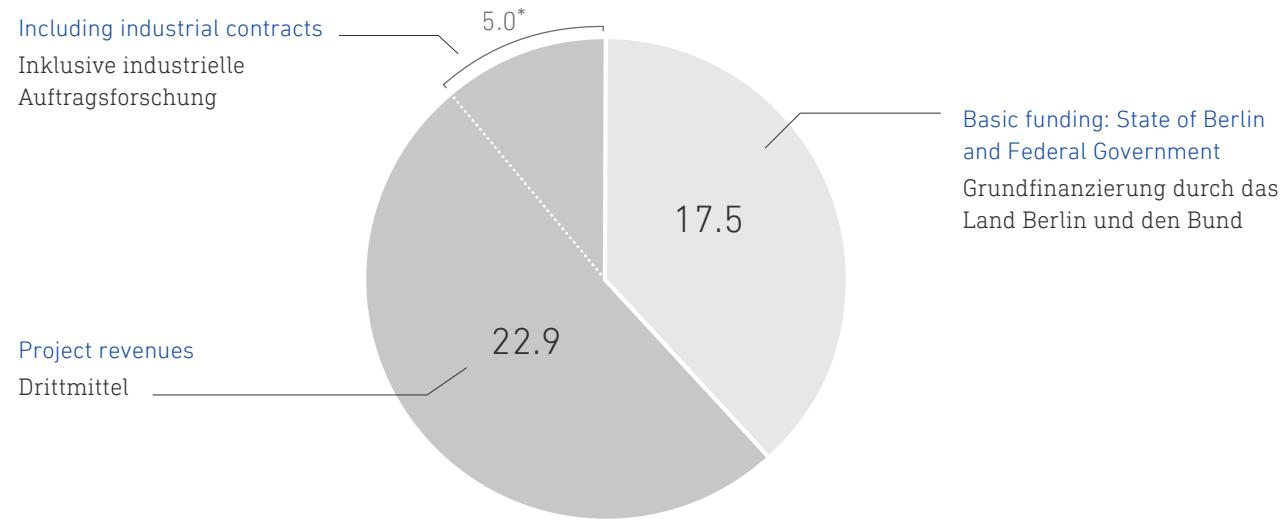
Facts & Figures

Zahlen & Fakten

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

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

2019



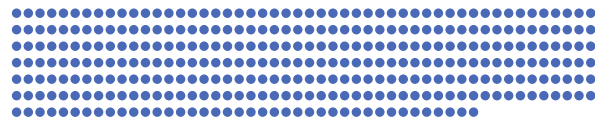
2019

2020

* 2019: income-based, €2.5 million on expenditure basis

Staff | Team

310 340



Scientists | Wissenschaftlerinnen & Wissenschaftler

110 120



PhD candidates | Promovierende

34 32



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

25 33

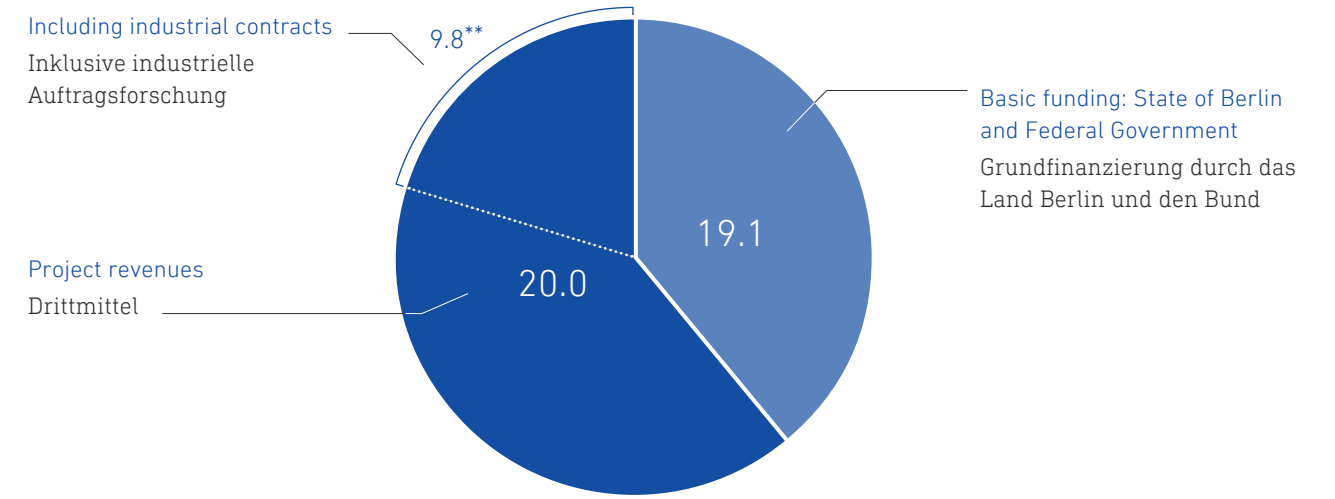


Trainees | Auszubildende

12 10



2020



2019

2020

** 2020: income-based, €4.6 million on expenditure basis

Projects | Laufende Projekte

243 246



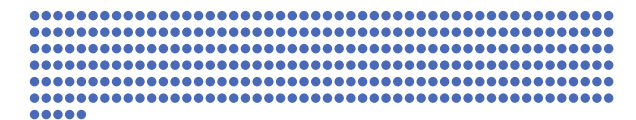
Publications (peer reviewed) | Publikationen (referiert)

108 103



Patents | Patente

285 305



Talks (invited) | Vorträge (eingeladene)

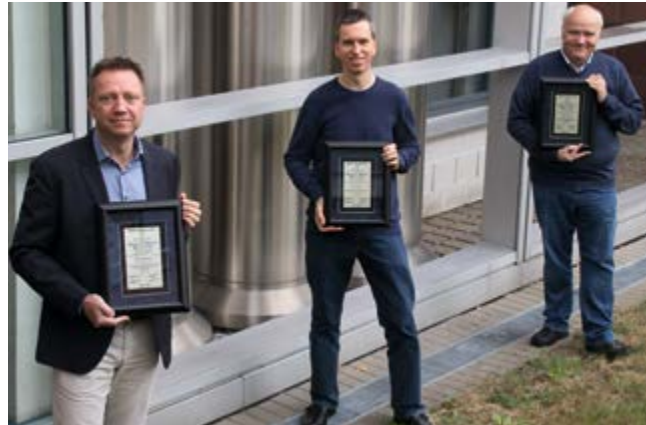
147⁽²⁴⁾ 87^{(12)*}



* 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



🕒 Meggers Award winners (f.l.t.r.): M. Maiwald, K. Sowoidnich, B. Sumpf. Preisträger des Meggers Awards (v.l.n.r.): M. Maiwald, K. Sowoidnich, B. Sumpf.

William F. Meggers Award of the SAS presented to FBH authors

The paper "Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy with Charge-Shifting Charge-Coupled Device (CCD) Lock-In Detection" was honored with the prestigious William F. Meggers Award of the Society for Applied Spectroscopy (SAS). The prize recognizes the publication of the authors Kay Sowoidnich, Michael Towrie, Martin Maiwald, Bernd Sumpf and Pavel Matousek as the outstanding publication of the year 2019 in the journal "Applied Spectroscopy" (vol. 73, no. 11, pp. 1265-1276). The paper is one result of the very successful collaboration between the Ferdinand-Braun-Institut and the Rutherford Appleton Laboratory in Great Britain.

Secure satellite communication – Berlin team wins INNOspace Masters

A team from Berlin – among them scientists from the FBH – won the DLR Challenge in October 2020. In addition, the winning QuMSeC project was chosen as overall winner of the 2019/20 INNOspace Masters. The project was selected from 117 submitted ideas and deals with tap-proof quantum communication, which is supposed to work in the future even with untrusted satellites. The winning team includes Markus Krutzik, who manages the Joint Lab Integrated Quantum Sensors at FBH, which is collaboratively operated by FBH and Humboldt-Universität zu Berlin. The idea for the winning project was developed together with Mustafa Gündogan from the Joint Lab and Janik Wolters, who conducts research at the DLR Institute for Optical Sensor Systems and Technische Universität Berlin.

William F. Meggers Award der SAS an FBH-Autoren verliehen

Das Paper „Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy with Charge-Shifting Charge-Coupled Device (CCD) Lock-In Detection“ wurde mit dem renommierten William F. Meggers Award der Society for Applied Spectroscopy (SAS) ausgezeichnet. Der Preis würdigt die Publikation der Autoren Kay Sowoidnich, Michael Towrie, Martin Maiwald, Bernd Sumpf und Pavel Matousek als die herausragende Veröffentlichung des Jahres 2019 in der Fachzeitschrift „Applied Spectroscopy“ (vol. 73, no. 11, pp. 1265-1276). Das Paper ist im Zuge der sehr erfolgreichen Zusammenarbeit des Ferdinand-Braun-Instituts mit dem Rutherford-Appleton-Laboratory in Großbritannien entstanden.

Sichere Satellitenkommunikation – Berliner Team gewinnt INNOspace Masters

Ein Berliner Team – darunter Wissenschaftler aus dem FBH – hat im Oktober 2020 die DLR Challenge gewonnen. Zudem wurde das siegreiche Projekt QuMSeC zum Gesamtgewinner des INNOspace Masters 2019/20 gekürt. Das Projekt wurde aus 117 eingereichten Ideen ausgewählt und beschäftigt sich mit der abhörsicheren Quantenkommunikation, die künftig auch bei nicht-vertrauenswürdigen Satelliten funktionieren soll. Zum Gewinnerteam gehört Markus Krutzik, der am FBH das Joint Lab Integrated Quantum Sensors leitet, das FBH und Humboldt-Universität zu Berlin gemeinsam betreiben. Die Idee zum ausgezeichneten Projekt wurde zusammen mit Mustafa Gündogan aus dem Joint Lab sowie Janik Wolters, der am DLR Institut für Optische Sensorsysteme und der Technischen Universität Berlin forscht, entwickelt.



Selected FBH publications in Applied Physics Letters

The publication of a team of 12 authors from the Ferdinand-Braun-Institut and Lawrence Livermore National Laboratory (USA) was selected as Featured Article by the journal Applied Physics Letters. The editors of the journal honored the paper "Non-uniform longitudinal current density induced power saturation in GaAs-based high power diode lasers" by Seval Arslan (FBH) et. al., which they rank among the best scientific publications of the journal. The paper "Milliwatt power 233 nm AlGaIn-based deep UV-LEDs on sapphire substrates" by Neysha Lobo Ploch (FBH) et. al. made it on the cover of the same journal.

THz Science and Tech. Best Paper Award 2021

The 2021 THz Science and Tech. Best Paper Award of the IEEE MTT Society was presented to a team of eleven authors from Germany, Poland and Lithuania – including five scientists from the Ferdinand-Braun-Institut. It is awarded to M. Bauer, A. Rämmer, S. A. Chevtchenko, K. Y. Osipov, D. Cibiraite, S. Pralgauskaite, K. Ikamas, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer and H. G. Roskos for their paper entitled: "A High-Sensitivity AlGaIn/GaN HEMT Terahertz Detector With Integrated Broadband Bow-Tie Antenna" in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol. 9, Issue 4, pp. 430-444, July 2019. The award will be conferred during the International Microwave Symposium in June 2021 in Atlanta (USA).

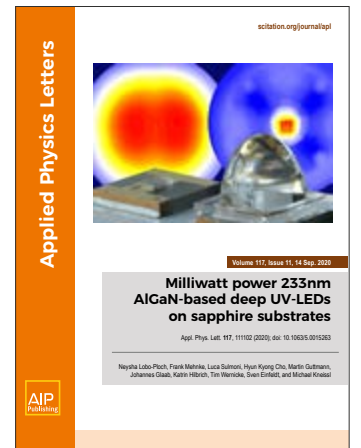
Reviewer Award for Carsten Netzel

In April 2021, IOP Publishing awarded FBH scientist Carsten Netzel an Outstanding Reviewer Award 2020 for the Journal of Physics D: Applied Physics. He is thus among the 24 international scientists who have provided special support to the journal's review process.

🕒 Winner team of InnoSpace Masters (f.l.t.r.): J. Wolters, M. Krutzik, M. Gündogan. Gewinnerteam des InnoSpace Masters (v.l.n.r.): J. Wolters, M. Krutzik, M. Gündogan.

Ausgezeichnete FBH-Paper bei Applied Physics Letters

Die Publikation eines 12-köpfigen Autoreteams aus dem Ferdinand-Braun-Institut und dem Lawrence Livermore National Laboratory (USA) wurde vom Journal Applied Physics Letters als Featured Article ausgewählt. Die Herausgeber des Journals zeichneten damit



das Paper „Non-uniform longitudinal current density induced power saturation in GaAs-based high power diode lasers“ von Seval Arslan (FBH) et. al. aus, das sie zu den besten wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Zeitschrift zählen. Auf das Cover der gleichen Zeitschrift schaffte es das Paper „Milliwatt power 233 nm AlGaIn-based deep UV-LEDs on sapphire substrates“ von Neysha Lobo Ploch (FBH) et. al.

THz Science and Tech. Best Paper Award 2021

Die IEEE MTT Society zeichnete ein elfköpfiges Autoreteam aus Deutschland, Polen und Litauen mit dem Best Paper Award aus – darunter fünf Wissenschaftler aus dem FBH. Die Auszeichnung geht an M. Bauer, A. Rämmer, S. A. Chevtchenko, K. Y. Osipov, D. Cibiraite, S. Pralgauskaite, K. Ikamas, A. Lisauskas, W. Heinrich, V. Krozer und H. G. Roskos für ihre Publikation mit dem Titel: „A High-Sensitivity AlGaIn/GaN HEMT Terahertz Detector With Integrated Broadband Bow-Tie Antenna“. Die Publikation ist in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol. 9, Issue. 4, pp. 430-444, July 2019 erschienen. Der Preis wird während des International Microwave Symposium im Juni 2021 in Atlanta (USA) verliehen.

Reviewer Award für Carsten Netzel

Im April 2021 hat der Wissenschaftsverlag IOP Publishing dem FBH-Wissenschaftler Carsten Netzel einen Outstanding Reviewer Award 2020 für die Zeitschrift Journal of Physics D: Applied Physics verliehen. Er ist damit einer von insgesamt 24 internationalen Wissenschaftlern, die den Reviewprozess des Journals in besonderer Weise begleitet haben.



🔗 Federal Research Minister Anja Karliczek (m.) discussing quantum technologies with experts including Markus Krutzik (r.) from FBH.
Bundesforschungsministerin Anja Karliczek (m.) diskutiert mit Experten über Quantentechnologien, darunter Markus Krutzik (r.) vom FBH.

Events for experts Veranstaltungen für das Fachpublikum

Quantum technologies in focus

In the field of quantum technologies, the Ferdinand-Braun-Institut has initiated comprehensive activities together with the Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin). The aim is to consolidate research and development in this pioneering field and to establish sustainable networks. Due to the Corona pandemic, the activities were held partly virtually.

Regional and European networking

Under the leadership of FBH, a network of scientific institutions and companies in the field of quantum technologies is to be set up. The initiative aims to establish complete value chains of photonic components and systems within the region. To kick start the initiative, the Innovation Forum on Photonic Quantum Technologies was held in March 2020. Almost 90 participants took advantage of the event by presenting their activities in quantum technologies and discussing opportunities for collaboration.

How can the government support companies and scientific institutions in the development of quantum technologies? In November, Federal Research Minister Anja Karliczek discussed this issue in a livestream with Markus Krutzik from FBH and further participants. The Quantum Future Academy, planned in parallel, targets the next generation of European researchers from colleges and universities. It is jointly organized by FBH and HU Berlin as local partners. The attendance week had to be postponed to 2021. However, a virtual event with keynote lectures and a video lab tour at FBH gave a first impression.

Quantentechnologien im Fokus

Im Bereich der Quantentechnologien hat das Ferdinand-Braun-Institut gemeinsam mit der Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin) umfassende Aktivitäten initiiert. Damit sollen Forschung und Entwicklung in diesem Zukunftsfeld verstetigt und nachhaltige Netzwerke etabliert werden. Aufgrund der Corona-Pandemie fanden die Aktivitäten teils virtuell statt.

Regional und europäisch vernetzt

Unter Federführung des FBH soll ein Netzwerk aus Wissenschaftseinrichtungen und Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien entstehen. Ziel der Initiative ist es, vollständige Wertschöpfungsketten photonischer Komponenten und Systeme in der Region zu etablieren. Das Innovationsforum Photonische Quantentechnologien im März 2020 machte den Auftakt. Fast 90 Teilnehmende nutzten die Veranstaltung, um ihre Aktivitäten in der Quantentechnologie vorzustellen und Möglichkeiten der Zusammenarbeit zu diskutieren.

Wie die Regierung Unternehmen und wissenschaftliche Institutionen bei der Entwicklung von Quantentechnologien unterstützen kann? Darüber diskutierte im November Bundesforschungsministerin Anja Karliczek im Livestream unter anderem mit Markus Krutzik vom FBH. Die parallel geplante Quantum Future Academy hat den europäischen Nachwuchs von Hoch-

schulen und Universitäten im Blick. Sie wird gemeinsam von FBH und HU Berlin als Partner vor Ort organisiert. Die Präsenzwoche musste auf 2021 verschoben werden. Einen Vorgesmack gab jedoch ein virtuelles Event mit Impulsvorträgen und einer Video-Laborführung am FBH.



Hosting international conferences



Technologies and Applications of Ultraviolet LEDs - ICULTA

The second international ICULTA conference was originally planned for 2020, but had to be postponed due to corona. In the meantime, it took place virtually in April 2021 with more than 320 participants from 33 countries – again organized by the Advanced UV for Life consortium with its office at FBH and the International Ultraviolet Association.



To look forward to: ISLC will be held in Potsdam in 2021

Another conference, lead-organized by FBH, could not take place in 2020 as planned. Thus, the 27th International Semiconductor Laser Conference in Potsdam has been rescheduled to October 2021. Two other conferences in which FBH is actively involved were postponed to 2022. <https://www.islc2021.org>

Organisation internationaler Konferenzen

Technologien und Anwendungen ultravioletter LEDs – ICULTA

Die zweite internationale ICULTA-Konferenz war ursprünglich für 2020 geplant, wurde jedoch coronabedingt verschoben. Sie fand inzwischen mit mehr als 320 Teilnehmenden aus 33 Ländern im April 2021 virtuell statt – erneut organisiert von dem Konsortium Advanced UV for Life mit seiner Geschäftsstelle am FBH und der International Ultraviolet Association.

Zum Vorfremuen: ISLC findet 2021 in Potsdam statt

Eine weitere Konferenz, die vom FBH federführend organisiert wird, konnte 2020 nicht wie geplant stattfinden. So wurde die 27. International Semiconductor Laser Conference in Potsdam auf Oktober 2021 verlegt. Zwei weitere Konferenzen, in die das FBH aktiv eingebunden ist, wurden in das Jahr 2022 verschoben. <https://www.islc2021.org>



FBH at Photonics West 2020 – at that time still on site.
FBH auf der Photonics West 2020 – damals noch vor Ort.

Further trade fairs and conferences

In January 2020, FBH presented its diode lasers and laser modules for materials processing, LiDAR, healthcare and Raman spectroscopy to an expert audience at Photonics West in San Francisco. FBH showcased further developments at the associated exhibition – as in previous years at the joint booth of the German Pavilion. At one of the last in-person events in 2020, the German Microwave Conference (Gemic), FBH presented developments for future applications in mobile communications and for green IT solutions.

Subsequently, the technical conferences were shifted to virtual space: FBH was represented with several technical papers at the International Microwave Symposium in June 2020. The same applies to the European Microwave Week, which was rescheduled from October 2020 to January 2021 and took place online. There, FBH presented itself at the virtual booth of Research Fab Microelectronics Germany (FMD). Photonics West, planned for early 2021, was postponed to March and finally took place online. FBH participated in the conference in 2021, but decided not to take part in the trade fair. Postponed – at least partially – is a

central European event of the photonics industry: The CLEO conference will be held virtually in June 2021, while the associated trade show Laser World of Photonics, where FBH is always prominently represented, has been moved to 2022.



FBH exhibiting at the FMD virtual booth.
Das FBH stellt auf dem virtuellen Messestand der FMD aus.

Weitere Messen und Konferenzen

Im Januar 2020 stellte das FBH auf der Photonics West in San Francisco seine Diodenlaser und Lasermodule für Materialbearbeitung, LiDAR, Medizin und Raman-Spektroskopie einem Fachpublikum vor. Weitere Entwicklungen präsentierte das FBH auf der angeschlossenen Ausstellung – wie in den Vorjahren auf dem Gemeinschaftsstand des Deutschen Pavillon. Auf einer der letzten Präsenzveranstaltungen 2020, der German Microwave Conference (Gemic), stellte das FBH Entwicklungen für künftige Anwendungen in der Mobilkommunikation und für Green-IT-Lösungen vor.

In der Folgezeit wurden die Fachkonferenzen in den virtuellen Raum verlegt: Auf dem International Microwave Symposium im Juni 2020 war das FBH mit mehreren Fachbeiträgen vertreten. Gleiches gilt für die European Microwave Week, die von Oktober 2020 auf Januar 2021 verschoben wurde und online

stattfind. Dort präsentierte sich das FBH auf dem virtuellen Messestand der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD). Die für Anfang 2021 geplante Photonics West wurde auf März verschoben und fand schließlich online statt. Das FBH hat 2021 an der Konferenz teilgenommen, jedoch auf die Messebeteiligung verzichtet. Verschoben – zumindest teilweise – ist ein zentrales europäisches Event der Photonik-Branche: Die CLEO-Konferenz findet im Juni 2021 virtuell statt, während die angeschlossene Messe Laser World of Photonics, auf der das FBH stets prominent vertreten ist, auf 2022 verlegt wurde.

Further events Sonstige Veranstaltungen

FBH at Leibniz in the Bundestag

Within the framework of "Leibniz in the Bundestag", FBH and partners from Research Fab Microelectronics Germany had several conversations with members of the Bundestag in May 2020. Topics addressed were how structural change can be successfully achieved through high-tech research and how to secure technological sovereignty in Europe.

FBH bei Leibniz im Bundestag

Im Rahmen von „Leibniz im Bundestag“ führte das FBH gemeinsam mit Partnern der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland im Mai 2020 mehrere Gespräche mit Bundestagsabgeordneten. Themen waren, wie der Strukturwandel mithilfe von Hightech-Forschung gelingen kann und wie sich die Technologiesouveränität in Europa sichern lässt.

- Günther Tränkle with FDP member of the Bundestag Thomas Sattelberger.
 Günther Tränkle mit dem FDP-Bundestagsabgeordneten Thomas Sattelberger.



For the interested future staff Für den interessierten Nachwuchs

Unfortunately, many events related to vocational training also had to be canceled or held online in 2020. Virtual lab tours conducted by trainees at FBH were very popular. The apprentices then answered the students' questions about careers and training in the high-tech sector together with the team from ANH Berlin (Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin), which is based at the institute.

Leider mussten 2020 auch viele Veranstaltungen rund um die berufliche Ausbildung abgesagt oder online durchgeführt werden. Gut angekommen sind dabei virtuelle Labortouren, die Auszubildende am FBH durchführten. Anschließend standen diese den Schülerinnen und Schülern gemeinsam mit dem Team des am Institut angesiedelten Aus- und Weiterbildungsnetzwerks Hochtechnologie Berlin Rede und Antwort für alle Fragen zu Berufen und Ausbildung im Hightech-Bereich.

FBH sporty FBH sportlich

The sporting success of the FBH running team with Veit Hoffmann, Nicolas Hübener and Christoph Stölmacker is almost a tradition. In 2020, they won the 3 x 2.9 km Adlershof men's company relay already for the fourth time.

Beinahe schon eine Tradition ist der sportliche Erfolg des FBH-Laufteams mit Veit Hoffmann, Nicolas Hübener und Christoph Stölmacker. Sie gewannen 2020 bereits zum vierten Mal die 3 x 2,9 km Adlershofer Firmenstaffel der Männer.



Full FBH power (v.l.t.r.): N. Hübener, C. Stölmacker, V. Hoffmann.
Geballte FBH power (v.l.n.r.): N. Hübener, C. Stölmacker, V. Hoffmann.

Structure of the Institute Institutstruktur

The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut fuer Hoehstfrequenztechnik 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 one hundred percent subsidiary of the State of Berlin since 01.01.2021 and is a member of the Leibniz Association.

The Leibniz Association connects 96 independent research institutions that range in focus from natural, engineering and environmental sciences to economics, spatial and social sciences and the humanities. Leibniz Institutes address issues of social, economic and ecological relevance. The Leibniz Institutes employ around 21,000 people, The financial volume amounts to 2 billion euros.

Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organisiert seine Forschungsaktivitäten in Labs und Departments in den vier Forschungsbereichen Photonik, integrierte Quantentechnologie, III/V-Elektronik und III/V-Technologie. Hierbei kooperiert das FBH im Rahmen von Joint Labs eng mit Universitäten. Mit seinem Wissenschaftsmanagement verfügt das Institut über eine Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Bildung. Hier werden verschiedene Vorhaben zur Vernetzung im Hochtechnologie-Bereich koordiniert; das Department ist zudem für 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 96 selbständige Forschungseinrichtungen. Ihre Ausrichtung reicht von den Natur-, Ingenieur- und Umweltwissenschaften über die Wirtschafts-, Raum- und Sozialwissenschaften bis zu den Geisteswissenschaften. Leibniz-Institute widmen sich gesellschaftlich, ökonomisch und ökologisch relevanten Fragen. Die zugehörigen Institute beschäftigen knapp 21.000 Personen. Der Gesamtetat liegt bei mehr als 2 Milliarden Euro.

How to get in touch

Wie Sie uns erreichen

Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik gGmbH Gustav-Kirchhoff-Str. 4 12489 Berlin, Germany	Phone +49.30.6392-2600 Fax +49.30.6392-2602 Email fbh@fbh-berlin.de Web https://www.fbh-berlin.de
---	--

Scientific Director wissenschaftlicher Geschäftsführer Prof. Dr. rer. nat. Günther Tränkle	Phone +49.30.6392-2601 guenther.traenkle@fbh-berlin.de
---	---

Administrative Director administrativer Geschäftsführer Christian Köhler-Ma	
--	--

Assistant to the Directors Referentin der Geschäftsführung Science Management Wissenschaftsmanagement Doreen Friedrich, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH)	Phone +49.30.6392-3391 doreen.friedrich@fbh-berlin.de
--	--

Communications Kommunikation Petra Immerz, M.A.	Phone +49.30.6392-2626 petra.immerz@fbh-berlin.de
--	--

Central Contact for Research Areas

Fachliche Ansprechpartner für die Forschungsbereiche

Photonics Photonik Prof. Dr. rer. nat. Günther Tränkle	Phone +49.30. 6392-2601 guenther.traenkle@fbh-berlin.de
---	--

III-V Electronics III/V-Elektronik Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich	Phone +49.30.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
--	---

Integrated Quantum Technology Integrierte Quantentechnologie Dr. rer. nat. Andreas Wicht	Phone +49.30.6392-3958 andreas.wicht@fbh-berlin.de
--	---

III-V Technology III/V-Technologie Prof. Dr. rer. nat. Markus Weyers	Phone +49.30.6392-2670 markus.weyers@fbh-berlin.de
---	---



Imprint

Impressum

Ferdinand-Braun-Institut gGmbH Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin, Germany

Phone +49.30.6392-2600

Fax +49.30.6392-2602

Email fbh@fbh-berlin.de

Web <https://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, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik gGmbH, Berlin 07/2021

Editors | Redaktion

Petra Immerz, Gisela Gurr

Layout | Gestaltung

telegrafik berlin

Printing | Druck

Format Druck und Medienservice GmbH

Images & Graphics | Fotos & Grafiken

K. Bilo: p. 2

C. Ruß: p. 6

M. Baumbach: pp. 7, 8, 14, 18, 22, 116, 120, 135

P. Immerz: pp. 16, 17, 25, 27, 28, 31, 41, 43, 47, 60, 63, 65, 68, 74, 83, 87, 88, 93, 96, 104, 114, 124 (top), 128

BMBF/Hans-Joachim Rickel: p. 21

OQmented: pp. 23, 24

C. Sicher/Universitätsmedizin Greifswald: p. 29

B. Schurian: pp. 32, 84, 100, 101, 108

K. Sowoidnich: p. 33

BeamXpert: p. 35

CNES/Illustration D. Ducros: pp. 37 (top), 64

Toptica eagleyard: p. 37 (bottom)

TRUMPF Group: p. 38

freepik.com: pp. 46, 50–53

Lancaster University/C. Paoloni: p. 48

J. Schleusner/Charité – Universitätsmedizin Berlin: p. 75 (top)

P. Zwicker/Universitätsmedizin Greifswald: p. 75 (bottom)

OHB: p. 82

HU Berlin: pp. 89, 124 (bottom)

N. Vlach: p. 103

BMBF: p. 126

C. Grimm: p. 129

further | weitere: FBH or private



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