



Leibniz
Ferdinand
Braun
Institut

Annual Report

Jahresbericht

2017

Annual Report
Jahresbericht
2017

Editorial Vorwort

Excellent research under the best possible conditions – that is the success story of more than 25 years of the Ferdinand-Braun-Institut in a nutshell. FBH is synonymous with top performance in semiconductor diode lasers, microwave and power electronics devices, and UV LEDs.

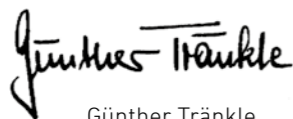
The "Research Fab Microelectronics Germany" (FMD) builds upon this experience, and the Federal Ministry of Education and Research is providing FBH with more than 34 million euros for the initiative. This money is going into new, cutting-edge technology equipment. Thirteen institutes of the Fraunhofer-Gesellschaft and the Leibniz Association are operating the FMD together to make technologies of the next decade accessible to small and mid-sized enterprises, in particular. Conducting joint research into technological processes, the FMD is a single source for research services along the entire innovation chain.

FBH is currently establishing the research area "Integrated Quantum Technology" as a new driver of advancements in the field. The nucleus of this is the Joint Lab Metrology, which FBH and Humboldt-Universität zu Berlin have been jointly operating for more than ten years. Another two University departments and three junior research groups are planned to be integrated in the future. This way development will expand to include not only coherent beam sources for use in space, but also entire assemblies as technologies for both terrestrial and space applications. Once that happens, there will be collaborations with potential users to develop standardized and usable systems for quantum sensing and quantum communications. The funding authorities are increasing FBH's basic funding for this by 4.1 million euros.

With these new research approaches, we are creating ideal conditions for networking even more closely with partners from research and industry and for developing the most fitting solutions for our customers.

We thank all those who have been with us for so many years, and look forward to new companionship on the road ahead. My thanks go to the employees of the Ferdinand-Braun-Institut, who are giving all their dedication and expertise to ensure our ambitious projects continue running at the highest possible level. I thank our partners from research and industry for their confidence and for the many exciting projects and commissions with which they have entrusted us. I also thank our State and Federal funding authorities for their outstanding cooperation and for the financial means that keep our sophisticated laboratories going.

I am very much looking forward to even more exciting developments and excellent cooperation with all of you. I hope you find this summary of the results and events from 2017 an enjoyable read.



Günther Tränkle



Exzellente Forschung unter erstklassigen Bedingungen – das bringt die mehr als 25-jährige Erfolgsgeschichte des Ferdinand-Braun-Instituts auf den Punkt. Das Institut steht für Spitzenleistungen bei Halbleiter-Diodenlasern, Mikrowellen- und Leistungsbau-elementen sowie UV-Leuchtdioden.

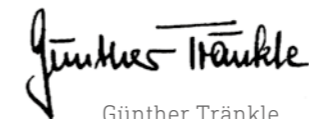
Darauf baut die „Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland“ (FMD) auf, für die das FBH vom Bundesministerium für Bildung und Forschung über 34 Millionen Euro erhält. Diese Gelder fließen in eine neue, leistungsfähige technologische Ausstattung auf dem aktuellen Stand der Technik. In der FMD bieten 13 Institute der Fraunhofer-Gesellschaft und Leibniz-Gemeinschaft insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen Zugang zu den Technologien des nächsten Jahrzehnts. Die Forschungsfabrik erforscht gemeinsam technologische Prozesse und bietet Forschungsdienstleistungen aus einer Hand entlang der kompletten Innovationskette.

Darüber hinaus etabliert das FBH zurzeit den neuen Forschungsbereich „Integrierte Quantentechnologie“, der weitere Impulse verspricht. Der Nukleus dafür ist das Joint Lab Laser Metrology, das von FBH und Humboldt-Universität zu Berlin seit zehn Jahren gemeinsam betrieben wird. Künftig sollen zwei weitere Fachgebiete der Universität und drei Nachwuchsgruppen einbezogen werden. So sollen bald nicht nur kohärente Strahlquellen für Weltraumanwendungen entstehen, sondern ganze Baugruppen in einer für den Feld- und Raumfahrteinsatz geeigneten Technologie. Künftig werden dann gemeinsam mit potenziellen Anwendern standardisierte und nutzbare Systeme für die Quantensensorik und Quantenkommunikation entwickelt. Die Zuwendungsgeber erhöhen dafür die Grundfinanzierung des FBH um 4,1 Millionen Euro.

Durch diese neuen Forschungsakzente schaffen wir die Voraussetzungen, um uns noch stärker mit Partnern aus Forschung und Industrie zu vernetzen und die passenden Angebote für unsere Kunden zu entwickeln.

Wir danken all denjenigen, die uns seit vielen Jahren begleiten und freuen uns auf neue Weggefährten. Mein Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Ferdinand-Braun-Institut, die mit Engagement und Know-how dafür sorgen, dass die anspruchsvollen Projekte auf höchstem Niveau durchgeführt werden. Bei unseren Partnern aus Forschung und Industrie bedanke ich mich für ihr Vertrauen und die vielen spannenden Projekte und Aufträge. Unseren Zuwendungsgebern des Landes Berlin und des Bundes gilt mein Dank für die finanziellen Mittel, die den Betrieb unserer aufwändigen Labore sicherstellen, und die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Ich freue mich auf weiterhin spannende Entwicklungen und die gute Kooperation mit Ihnen allen. Eine anregende Lektüre der Ergebnisse und Ereignisse aus dem Jahr 2017 wünscht Ihnen, Ihr



Günther Tränkle

Table of contents

Inhaltsverzeichnis

6	Profile Profil		
11	Highlights Schlaglichter		
53	Science Management Wissenschaftsmanagement		
65	Photonics Photonik		
68	Progress in the simulation of broad-area lasers		
70	Theoretical investigations of a DFB laser frequency-stabilized by a high-finesse resonator		
72	Progress in device design and technology for increased conversion efficiency in high-power diode lasers		
74	High-power distributed feedback lasers with apodized surface gratings for improved performance and yield		
76	High-power short-pulse laser sources for LiDAR systems		
78	Yellow laser sources for high-resolution confocal microscopy and ophthalmology		
80	Absolute wavelength-stabilized laser module emitting at 633 nm for interferometric ranging		
82	Dual-wavelength diode lasers with adjustable wavelength distance		
84	Radiation tests of volume-holographic Bragg gratings for space deployment of narrow linewidth laser modules		
86	Laser frequency stabilization with resonant optical feedback from a photonic integrated circuit		
88	Photocurrent spectroscopy and capacitance-voltage analysis of UV LEDs during lifetime tests		
90	UVB LEDs with improved power and lifetime		
92	Blue-violet DFB laser diodes based on GaN using 10 th order laterally coupled surface gratings		
95	III-V Electronics III/V-Elektronik		
98	Digital sequential PA for flexible efficiency tuning over a wide power back-off range		
100	Boosting efficiency – envelope tracking for space applications		
102	Progress in InP HBT device technology and circuit fabrication		
104	Requirements in metrology calibration applications		
106	Normally-off AlGaIn/GaN HFETs using strain adjustment in gate trench region		
108	Robust power-switching with lateral normally-off 600 V GaN transistors		
110	Design and gate-control of 600 V monolithically integrated normally-off bidirectional GaN-on-Si HFETs		
112	Gallium oxide technology for high-voltage switching devices		
115	III-V Technology III/V-Technologie		
118	Sputtered AlN as base layer for UV LEDs		
120	Development of improved packaging for high-power UV LEDs		
122	Fabrication of monolithic optical microsystems for the stabilization of light sources		
124	Advancing the high-frequency performance of FBH's InP MMIC process – development of epitaxial structure and device scaling		
126	Advancing the high-frequency performance of FBH's InP MMIC process – optimization of the ohmic contacts		
129	Annex Anhang		

Who we are – FBH at a glance

Wer wir sind – Das FBH im Profil

The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut fuer Hoechstfrequenztechnik (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. 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 economic low-voltage drivers for use in a variety of applications.

The FBH is a competence center for III-V compound semiconductors and has a strong international reputation. FBH competence covers the full range of capabilities, from design through fabrication to device characterization.

In close cooperation with industry, its research results lead to cutting-edge products. The institute also successfully turns innovative product ideas into spin-off companies. Overall, working in strategic partnerships with industry, FBH ensures Germany's technological excellence in microwave and opto-electronic research.



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. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme, für industrielle Sensorik und Bildgebung sowie Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Darüber hinaus entwickelt es Lasertreiber sowie kompakte atmosphärische Mikrowellen-Plasmaquellen 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.

Seine Forschungsergebnisse setzt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen und Technologien erfolgreich durch Spin-offs. In strategischen Partnerschaften mit der Industrie sichert es in der Höchstfrequenztechnik die technologische Kompetenz Deutschlands.

What we do – research topics & competencies

Was wir tun – Forschungsthemen & Kompetenzbereiche

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 additionally created an active interface between science and industry. By means of prototypes it turns excellent research results into market-oriented products, processes, and services. The institute thus 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, laser metrology, ...
- nitride laser diodes for the blue & UV spectral range
- short-wave UV LEDs, e.g. for sensors, disinfection, medical & production technology, ...

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
- fast drivers for laser diodes
- 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 (SciFab) with IHP
- mounting & assembling

Science Management

- technology transfer & marketing
- education & training management

Für Partner aus Forschung und Industrie entwickelt das FBH hochwertige Produkte und Services, die exakt auf individuelle Anforderungen zugeschnitten sind. Mit seinem Entwicklungszentrum hat das Institut eine aktive Schnittstelle zwischen Wirtschaft und Wissenschaft geschaffen. Damit überführt es exzellente Forschungsergebnisse in marktorientierte Produkte, Verfahren und Dienstleistungen. Seinem internationalen Kundenstamm bietet es somit Know-how und Komplettlösungen aus einer Hand: vom Entwurf über lieferfähige 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, Lasermetrologie, ...
- Nitrid-Laserdioden für den blauen & UV-Spektralbereich
- Kurzwellige UV-Leuchtdioden, u.a. für Sensorik, Desinfektion, Medizin- und Produktionstechnik, ...

III/V-Elektronik

- GaN-Mikrowellentransistoren & -MMICs
- Neue Leistungsverstärkerkonzepte für die drahtlose Infrastruktur
- Integrierte Schaltungen mit InP-HBTs für den Frequenzbereich 100...500 GHz
- Schnelle Treiber für Laserdioden
- 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 (SciFab) mit dem IHP
- Aufbau- & Verbindungstechnik

Wissenschaftsmanagement

- Technologietransfer & Marketing
- Bildungsmanagement



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 microwaves and optoelectronics. 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 Mikrowellentechnik und Optoelektronik. 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 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.

Highlights Schlaglichter

Securing technological sovereignty – Research Fab Microelectronics Germany



Since April 2017, eleven institutes of the Fraunhofer Group for Microelectronics and the two Leibniz Institutes FBH and IHP have been cooperating in the "Research Fab Microelectronics Germany" (FMD). With this multi-location pool of technology, customers from large-scale industry, small and medium-sized enterprises, and universities will in future benefit from the entire value chain

for micro- and nanoelectronics from a single source. The Federal Ministry of Education and Research (BMBF) is funding the expansion of this technological infrastructure with a total of around 350 million euros. The aim of the initiative is to strengthen the position of Europe's semiconductor and electronics industry in the global competition and to maintain Germany's technological sovereignty.

The FMD partners presented their range of services in November, at the Productronica trade fair in Munich. In addition to the joint exhibition booth, the Research Fab held its "Industry meets FMD" event to present its future range of offerings for industrial partners.

Investing in innovation

Around 34 million euros of the BMBF funds are going to FBH, which is using these financial resources to modernize and expand its technological equipment. In July, at the new clean room of the Ferdinand-Braun-Institut, Federal Research Minister Prof. Johanna Wanka gave the start signal for the FMD in Berlin and Brandenburg. Altogether, more than 117 million euros, about a third of the total funding, are flowing into the region. With this support, the FMD partners are preparing the ground for cutting-edge research & development in microelectronics. They are also merging their expertise and resources into technology parks where they can make efficient and timely advancements in future-oriented research fields. Federal Minister Wanka says, "The microelectronics industry is investing in Germany again. This is a trend reversal that shows that our microelectronics research is securing future-proof jobs in the digital age."



📍 Berlin-Brandenburg kick-off event "Research Fab Microelectronics Germany" on July 6 at the FBH, from left to right: Prof. Dr. Klaus-Dieter Lang (Fraunhofer IZM), Prof. Dr. Günther Tränkle (FBH), Federal Minister Prof. Dr. Johanna Wanka (BMBF).

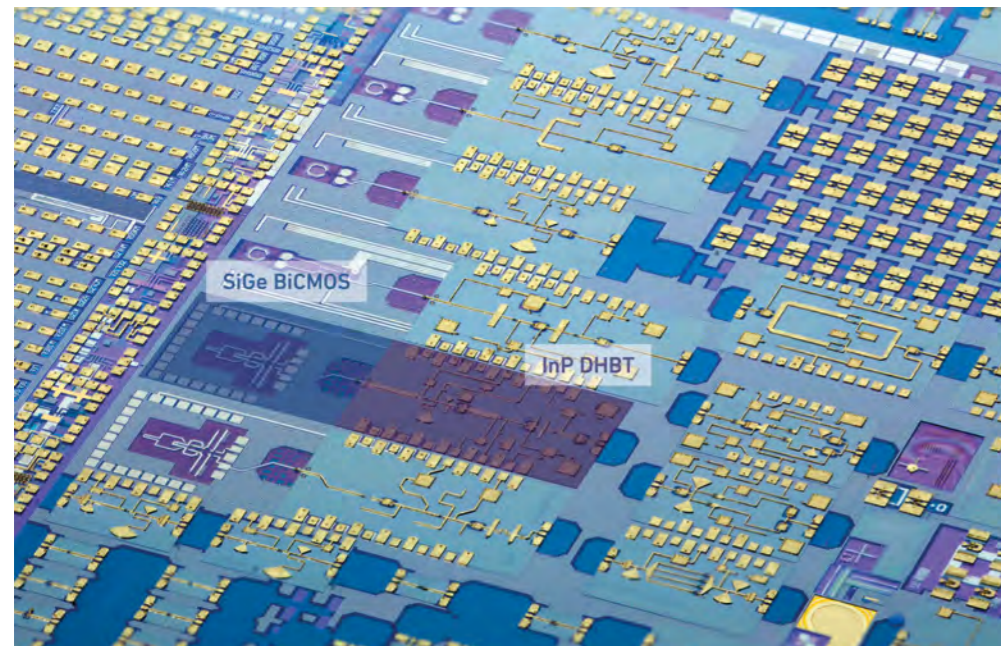
Berlin-Brandenburger Auftaktveranstaltung "Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland" am 6. Juli am FBH, v.l.n.r.: Prof. Dr. Klaus-Dieter Lang (Fraunhofer IZM), Prof. Dr. Günther Tränkle (FBH), Bundesministerin Prof. Dr. Johanna Wanka (BMBF).

FBH contributes its expertise in energy-efficient semiconductor components

FBH is researching new materials for semiconductor components used in diverse applications such as electromobility, alternative energies, and future mobile communications. It offers the entire value-added chain in-house: from chip design and manufacture to the production of complete modules.

Pushing the frequency limits and combining advantages with hetero-integrated chips

FBH is developing novel components based on indium phosphide (InP) for the terahertz frequency range. Applications for these components include medical technology, non-destructive testing, and safety engineering. These can also be combined with silicon to exploit the advantages of two technological worlds at chip level: hetero-integrated circuits that offer the high output powers of indium phosphide as well as the complexity of silicon technology. To this end, FBH is expanding its existing cooperation with the IHP in the scope of the FMD. High-frequency modules are being created on a single chip; this is all-important for producing portable and cost-effective system applications in the 100 to 500 GHz frequency range. These hetero-integrated chips provide capabilities that cannot be achieved with conventional semiconductor technology. Accordingly, FBH is setting up a production line to make quality InP circuit wafers on an industrial scale.



📌 Hetero-integrated chips that combine the advantages of two technology worlds.

Heterointegrierte Chips, die die Vorteile zweier Technologiewelten miteinander kombinieren.

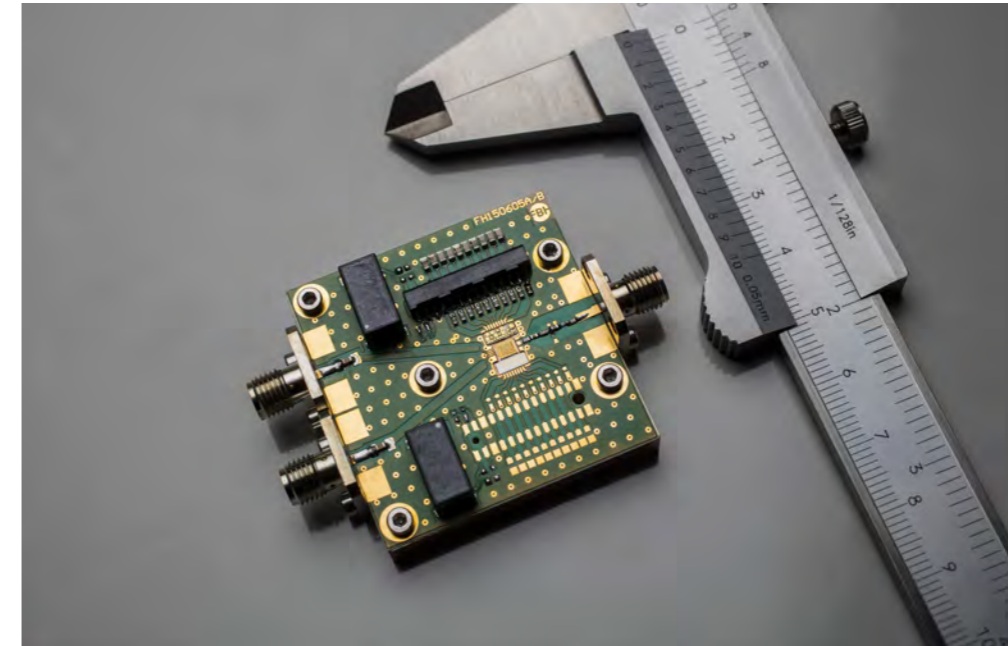
New wide-bandgap materials for efficient power electronics

Another research focus at FBH is electronic components based on the novel semiconductor materials aluminum nitride (AlN) and gallium oxide (Ga_2O_3). These have an even larger bandgap than the current favorite gallium nitride (GaN), and therefore promise advancements in the production of transistors and circuits for high voltages, as will be needed for energy-efficient power electronics.

Components for the future mobile telecommunications standard 5G

An important field of work at FBH is digitization and the future mobile telecommunications standard 5G, which will only become feasible once hardware components are more efficient and flexible. This can be achieved, among other things, by increasing the amount of digital switching circuitry. Focus is on the power amplifiers for transmitters, as these dominate the efficiency of the overall systems and, with it, the operating costs.

For several years, FBH has been developing new digital amplifier architectures that combine efficient power management with maximum flexibility. The long-term goal is a completely digital transmitter in which the chip can operate on all frequency bands. Another aspect to digitization is Discrete Envelope Tracking. This is where the supply voltage of the amplifier output stage is varied to ensure consistently high energy efficiency – despite the strong fluctuations in current draw that come with modern broadband modulation methods. As the name suggests, in Discrete



📌 Novel digital power amplifier module for mobile communications.

Neuartiges digitales Leistungsverstärker-Modul für die mobile Kommunikation.

Envelope Tracking, this variation is performed discretely, meaning it is only switched back and forth between several constant voltage values. This type of envelope tracking creates very efficient broadband solutions as are required for 5G.

First project phase successfully completed

The first nine months of the project, up until the end of 2017, at FBH were all about procuring the first lot of large facilities. Among the earliest ordered were the electron beam exposure system and the wafer stepper. By the end of the year, the first measuring station was already operational. The total order volume, including those measures already completed, amounted to 11.6 million euros as of December 31, 2017.



📌 FBH's new clean room at FBH – these laboratories will soon be filled with state-of-the-art high-tech equipment to develop microelectronic devices.

Der neue Reinraum am FBH – diese Labore werden sich bald mit Hightech-Equipment für Mikroelektronik-Bauelemente auf dem neuesten Stand der Technik füllen.

Technologiesouveränität sichern – Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

Seit April 2017 kooperieren elf Institute des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik und die beiden Leibniz-Institute FBH und IHP in der „Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland“ (FMD). Mit dem standortübergreifenden Technologiepool sollen Kunden aus Großindustrie, kleinen und mittleren Unternehmen sowie den Universitäten künftig von der gesamten Wertschöpfungskette für die Mikro- und Nanoelektronik aus einer Hand profitieren. Der Ausbau der technologischen Infrastruktur wird insgesamt mit rund 350 Millionen Euro vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Ziel der Initiative ist es, die Position der europäischen Halbleiter- und Elektronikindustrie im globalen Wettbewerb nachhaltig zu stärken und die Technologiesouveränität Deutschlands zu erhalten.

Bereits im November präsentierten die FMD-Partner ihr Leistungsspektrum auf der Fachmesse Productronica in München. Zusätzlich zum gemeinsamen Messestand informierte die Forschungsfabrik mit ihrer Veranstaltung „Industrie meets FMD“ über ihr künftiges Angebot für industrielle Partner.



📍 **Cutting of the cake at the Berlin-Brandenburg kick-off event "Research Fab Microelectronics Germany" on July 6 at FBH, from left to right: Prof. Schell (Fraunhofer HHI), Federal Minister Prof. Wanka (BMBF), Dr. Gutheil (State Secretary of Brandenburg), Prof. Tränkle (FBH), Prof. Tillack (IHP).**

Anschnitt der Torte bei der Berlin-Brandenburger Auftaktveranstaltung „Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland“ am 6. Juli am FBH, v.l.n.r.: Prof. Schell (Fraunhofer HHI), Bundesministerin Prof. Wanka (BMBF), Dr. Gutheil (Staatssekretärin Land Brandenburg), Prof. Tränkle (FBH), Prof. Tillack (IHP).

In Innovationen investieren

Rund 34 Millionen Euro der BMBF-Mittel gehen an das FBH, das mit diesen Geldern seine technologische Ausstattung modernisiert und ergänzt. Im Juli gab die Bundesministerin Johanna Wanka am neuen Reinraum des Ferdinand-Braun-Instituts den Startschuss für die FMD in Berlin und Brandenburg – in die Region fließen mehr als 117 Millionen Euro und damit etwa ein Drittel der Gesamtsumme. Mit dieser Unterstützung schaffen die FMD-Partner die Voraussetzung für modernste Forschung und Entwicklung in der Mikroelektronik. Zusätzlich bündeln sie ihr Know-how und ihre Ressourcen in Technologieparks, um zukunftsrelevante Forschungsthemen effizient und zeitnah voranzubringen. Bundesforschungsministerin Frau Prof. Johanna Wanka sagte dazu: „Die Mikroelektronik-Industrie investiert wieder in Deutschland. Das ist eine Trendwende, die zeigt: Unsere Mikroelektronik-Forschung sorgt für zukunftsfeste Arbeitsplätze im digitalen Zeitalter.“

FBH bringt Expertise bei energieeffizienten Halbleiter-Komponenten ein

Das FBH erforscht neuartige Materialien für Halbleiter-Bauelemente, die in Anwendungen wie der Elektromobilität, bei den alternativen Energien oder in der mobilen Kommunikation der Zukunft benötigt werden. Dabei bietet es die volle Wertschöpfungskette im eigenen Haus: vom Design über die Herstellung von Chips bis hin zu Modulen.

Frequenzgrenzen ausreizen und Vorteile kombinieren mit heterointegrierten Chips

Das FBH entwickelt neuartige Bauelemente auf der Basis von Indiumphosphid (InP) für den Terahertz-Bereich. Diese eignen sich unter anderem für die Medizintechnik, zerstörungsfreie Prüfung und die Sicherheitstechnik. Diese Bauelemente lassen sich auch mit Silizium kombinieren und vereinen damit die Vorteile zweier Technologiewelten auf Chipebene: heterointegrierte Schaltungen, die die hohen Ausgangsleistungen von Indiumphosphid mit der Komplexität der Siliziumtechnologie kombinieren. Im Rahmen der FMD baut das FBH daher seine bestehende Kooperation mit dem IHP aus. Dabei werden Höchsthfrequenzmodule auf einem Chip realisiert; dies ist für tragbare und kostengünstige System-Applikationen im Frequenzbereich zwischen 100 und 500 GHz entscheidend. Diese heterointegrierten Chips bieten Möglichkeiten, die mit konventioneller Halbleitertechnologie nicht realisiert werden können. Das FBH baut zu diesem Zweck eine Prozesslinie auf, um InP-Schaltkreiswafer im industriellen Qualitätsmaßstab herzustellen.

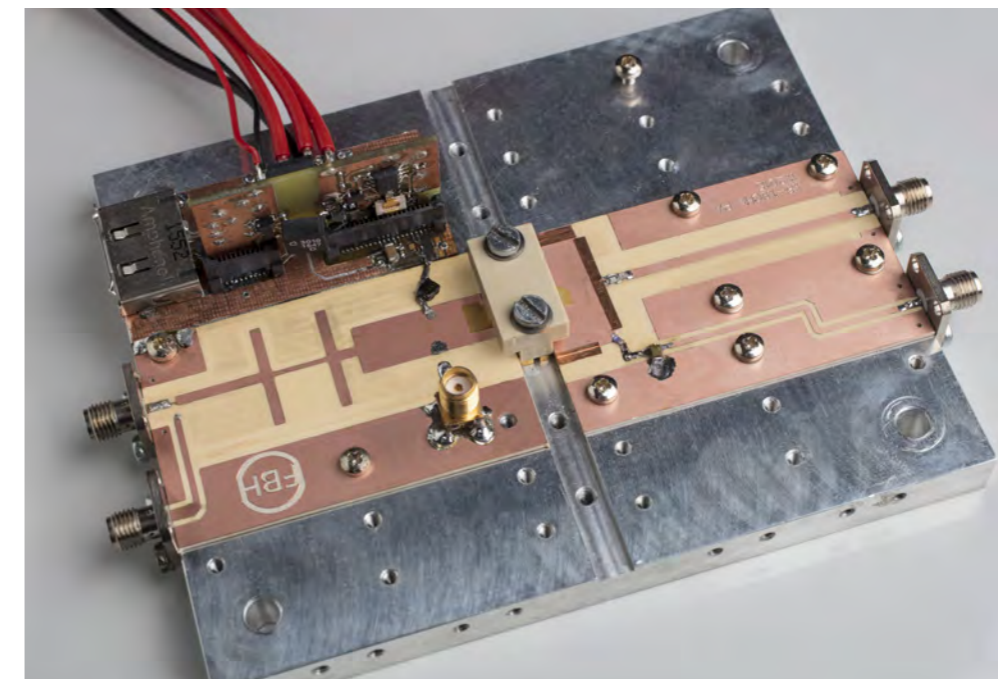
Neue Wide-Band-Gap-Materialien für die effiziente Leistungselektronik

In einem weiteren Forschungsschwerpunkt des FBH geht es um Elektronik-Komponenten auf Basis der neuartigen Halbleitermaterialien Aluminium-Nitrid (AlN) und Gallium-Oxid (Ga_2O_3). Diese haben eine noch größere Bandlücke als das derzeit verwendete Gallium-Nitrid (GaN) und versprechen deshalb Fortschritte bei der Realisierung von Transistoren und Schaltungen für hohe Spannungen, die für die energieeffiziente Leistungselektronik benötigt werden.

Komponenten für den Mobilfunkstandard der Zukunft 5G

Ein wichtiges Arbeitsfeld des FBH zielt auf die Digitalisierung und den künftigen Mobilfunkstandard 5G, für den Hardware-Komponenten effizienter und flexibler werden müssen. Das lässt sich unter anderem durch eine Erhöhung des digitalen Schaltungsanteils erreichen. Im Fokus stehen dabei die Leistungsverstärker der Transmitter, da diese die Effizienz des Gesamtsystems und damit auch die Betriebskosten dominieren.

Das FBH entwickelt seit einigen Jahren neue digitale Verstärkerarchitekturen, die ein effizientes Leistungsmanagement mit höchster Flexibilität verbinden. Langfristiges Ziel ist der komplett digitale Transmitter, bei dem ein Chip alle Frequenzbänder bedienen kann. Außerdem wird die Digitalisierung als Discrete Envelope Tracking (ET) realisiert. Dabei wird die Versorgungsspannung der Verstärkerendstufe variiert, um eine durchgehend gute Energieeffizienz sicherzustellen – trotz der stark schwankenden momentanen Leistung bei modernen breitbandigen Modulationsverfahren. Beim Discrete Envelope Tracking wird diese Variation diskret vorgenommen, das heißt es wird nur zwischen mehreren konstanten Spannungswerten hin- und hergeschaltet. Diese Version des ET führt zu sehr effizienten und breitbandigen Lösungen, wie sie für 5G benötigt werden.



📍 **Discrete envelope tracking system for class-G operation. Diskretes Envelope-Tracking-System für den Klasse-G-Betrieb.**

Erste Projektphase erfolgreich abgeschlossen

Die ersten neun Monate des Projektes bis Ende 2017 standen am FBH im Zeichen der Beschaffungsvorgänge für die ersten Großgeräte. So wurden unter anderem die Elektronenstrahlbelichtungsanlage und der Waferstepper bestellt. Zum Jahresende konnte bereits der erste Messplatz in Betrieb genommen werden, das gesamte Bestellvolumen inklusive der abgeschlossenen Maßnahmen zum 31.12.2017 betrug 11,6 Millionen Euro.

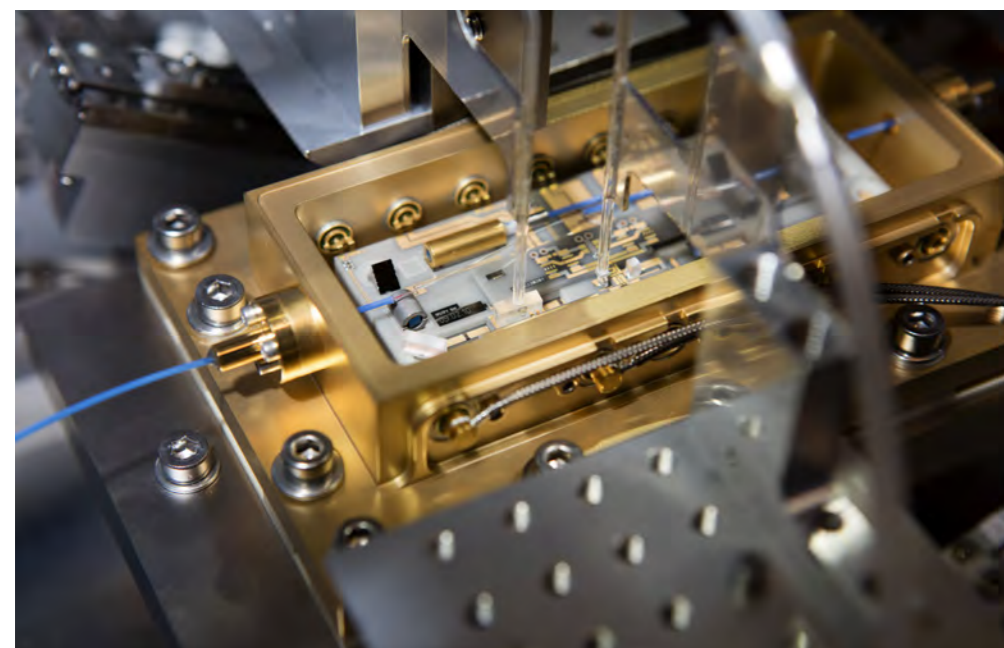
Exploiting the potential of quantum optical technologies

For many years, the Ferdinand-Braun-Institut has been developing miniaturized laser modules for use in space as part of its Joint Lab Laser Metrology with Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin). In January 2017, for example, a Bose-Einstein condensate was generated for the first time worldwide from a cloud of ultra-cold atoms onboard a sounding rocket. It was proven that quantum optical sensors can also be used in harsh environments such as space – a prerequisite for exploring fundamental questions of science. In the medium term, these developments will become the basis for using quantum optical technologies in everyday life, for example in navigation, climate monitoring, exploration of mineral resources, and the synchronization of networks. The quantum physics of ultra-cold atoms is also exploited in quantum computing and quantum simulation. Furthermore, there are other applications making use of the quantum nature of light. Single-photon sources and entangled photon generators, for example, will enable bug-proof quantum communication in which keys are exchanged between two partners in such a way that any eavesdropping will always be detected and compromised keys discarded. Other fields of application are quantum-assisted imaging and spectroscopy.

New research area creates a sound position for the future

National and international programs around the world are aiming to harness the outstanding potential of quantum technology. Germany's part in this is represented most notably in the national QUTEGA initiative and the European Quantum Technology Flagship. Photonics – in particular semiconductor laser technology – is coming to the fore. FBH will therefore be establishing a separate research area for quantum optical technologies.

The nucleus of the new research area "Integrated Quantum Technology" is the expertise of the Joint Lab Laser Metrology, which will integrate another two departments of HU Berlin in future. The Joint Lab has developed a worldwide unique micro-integration technology that is now being driven forward. The aim is to create not only coherent beam sources, but also entire assemblies such as miniaturized atomic traps, for example, as technologies suitable

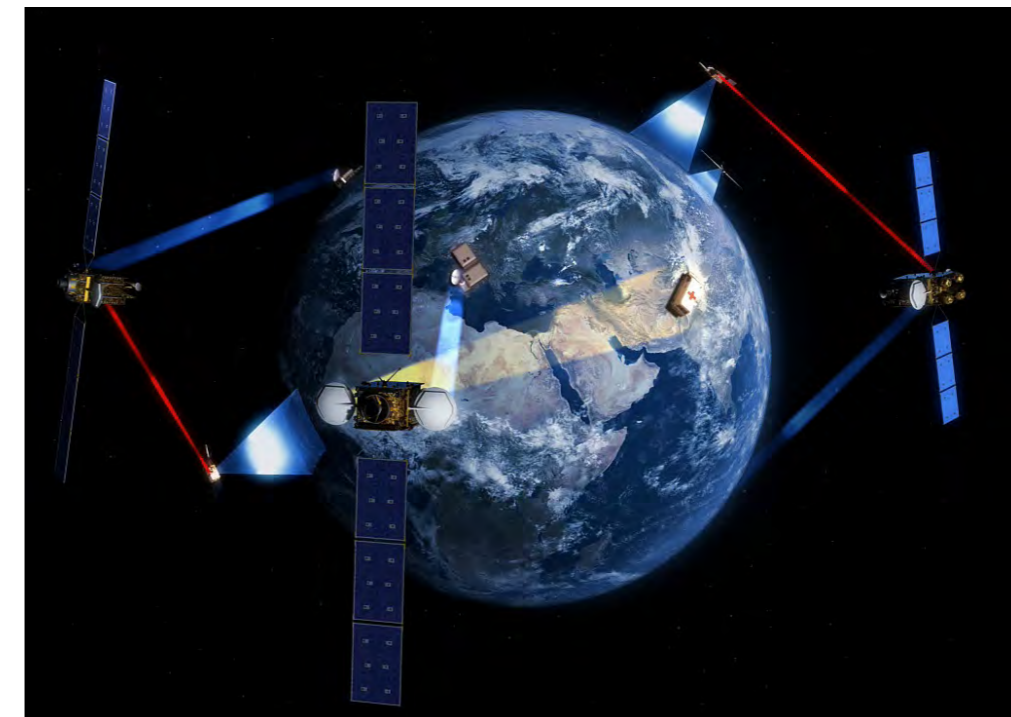


High-precision mounting of a fiber-coupled space-compatible diode laser module. Hochpräzisions-Montage eines fasergekoppelten Diodenlaser-Moduls für Weltraumanwendungen.

for terrestrial and space applications. Advanced manufacturing technologies such as additive manufacturing (3D printing) and laser materials processing with ultra-short-pulse lasers are also to be developed further. Standardized and usable quantum systems will be developed together with potential users. At the same time, there are plans to expand the activities around the semiconductor components themselves. Focus is on making further advancements in GaAs-based photonic integrated circuits. Alongside the actual light-generating structure, these contain functional elements that serve for beam conditioning and manipulation. Another emphasis is on passive components such as waveguides, which can be used to generate entangled photons.

Many years of expertise in laser modules for space applications

FBH has extensive experience from various DLR-funded collaborative projects in which complex micro-integrated laser modules were developed and implemented for use in quantum optical experiments. These were used to generate ensembles of ultra-cold rubidium and potassium atoms onboard sounding rockets. In three rocket missions, FBH successfully demonstrated the use of its technology with a total of ten laser modules. Based on this, in cooperation with NASA, a device is now to be developed for conducting quantum optical experiments with ultra-cold atoms onboard the International Space Station. For such space projects, FBH also has the benefit of many years of experience in developing pump lasers for satellites of the European Data Relay System; see p. 24 for further details.



The future European Data Relay System EDRS (graphic). Das künftige Europäische Datenrelaisystem EDRS (Grafik).

In May 2017, the first of three pilot projects funded by the BMBF, *Optical single-ion clock for users (optclock)*, in which FBH is also involved, was launched. The project is investigating a new generation of compact optical atomic clocks and developing a demonstrator based on a single ytterbium ion. This type of clock is one of the most accurate frequency standards ever demonstrated. So far, such clocks can only be operated in special laboratories under precisely defined conditions – but one day, they will become portable. FBH is developing the required frequency-stabilized diode laser used for spectroscopic observation of the clock transition.

Yet another FBH diode laser is to be tested onboard a sounding rocket as part of the *JoKaRUS* project in the second quarter of 2018. This light source is intended for a high-precision, iodine-based optical frequency reference. The diode laser module used for this employs a MOPA concept, where the radiation of a monolithic master oscillator (MO) is amplified by a semiconductor power amplifier (PA). A narrowband extended cavity diode laser serves as the MO.

Das Potenzial der quantenoptischen Technologien ausschöpfen

Das Ferdinand-Braun-Institut entwickelt im Rahmen seines Joint Labs Laser Metrology mit der Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin) seit vielen Jahren miniaturisierte Lasermodule für den Einsatz im Weltraum. Unter anderem konnte damit im Januar 2017 weltweit erstmalig an Bord einer Höhenforschungsrakete aus einer Wolke ultra-kalter Atome ein Bose-Einstein-Kondensat erzeugt werden. Dabei gelang der Nachweis, dass quantenoptische Sensoren auch in rauen Umgebungen wie dem Weltraum eingesetzt werden können – eine Voraussetzung, um zunächst fundamentale Fragen der Wissenschaft beantworten zu können. Mittelfristig legen diese Entwicklungen die Basis für den Einsatz quantenoptischer Technologien im Alltag, etwa für die Navigation, Klimaüberwachung, Exploration von Bodenschätzen sowie für die Synchronisation von Netzwerken. Die Quantenphysik ultra-kalter Atome wird auch für das Quanten-Computing und die Quanten-Simulation genutzt. Hinzu kommen Anwendungen, in denen die Quantennatur des Lichtes eine Rolle spielt. Einzelphotonenquellen oder die Erzeugung von verschränkten Photonen beispielsweise ermöglichen eine abhörsichere Quanten-Kommunikation, bei der Schlüssel zwischen zwei Partnern so ausgetauscht werden, dass eine Abhöraktion erkannt und ein kompromittierter Schlüssel verworfen werden kann. Weitere Anwendungsfelder sind die quantenunterstützte Bildgebung sowie die Spektroskopie.

Mit neuem Forschungsbereich gut aufgestellt für die Zukunft

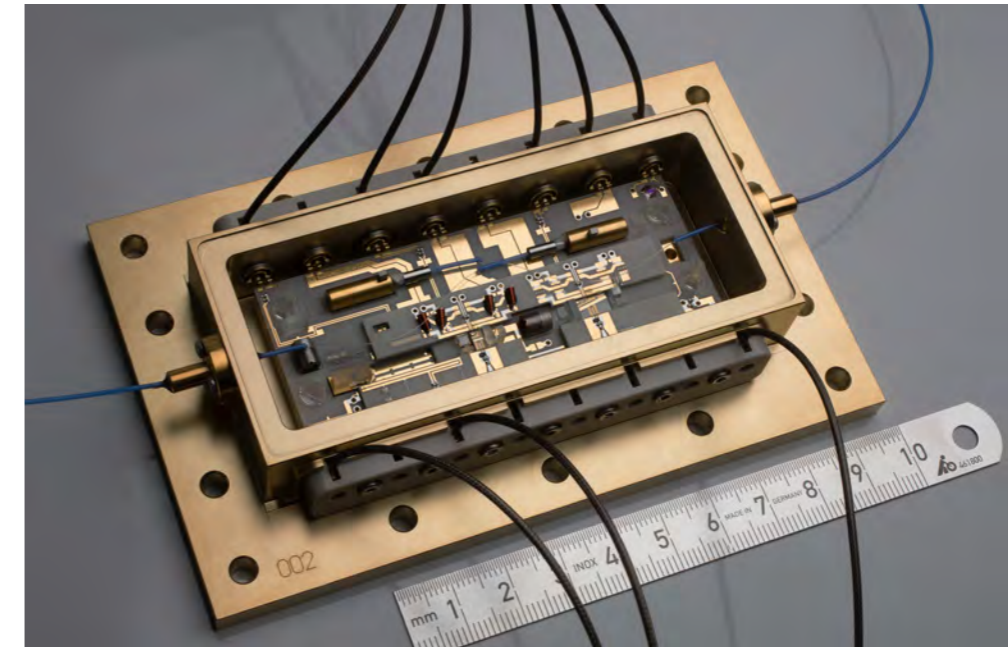
Weltweit zielen nationale und internationale Programme darauf, das herausragende Potenzial der Quantentechnologie nutzbar zu machen. Für deutsche Akteure sind vor allen Dingen die nationale QUTEQA-Initiative sowie das europäische Quantum Technology Flagship relevant. Die Photonik – insbesondere die Halbleiter-Lasertechnologie – rückt dabei in den Fokus. Daher wird am FBH künftig ein eigener Forschungsbereich für quantenoptische Technologien etabliert.

Keimzelle des neuen Forschungsbereiches „Integrierte Quantentechnologie“ ist die Expertise des Joint Labs Laser Metrology, in das künftig zwei weitere Fachgebiete der HU Berlin einbezogen werden sollen. Das Joint Lab hat eine weltweit einmalige Mikrointegrationstechnologie entwickelt, die nun weiter ausgebaut wird. So sollen nicht nur kohärente Strahlquellen entstehen, sondern ganze Baugruppen in einer für den Feld- und Raumeinsatz geeigneten Technologie, wie etwa miniaturisierte Atomfallen. Auch fortschrittliche Fertigungstechnologien wie die additive Fertigung (3D-Druck) sowie die Lasermaterialbearbeitung mit Ultra-Kurzpulslasern sollen weiterentwickelt werden. Gemeinsam mit potenziellen Anwendern sollen standardisierte und nutzbare Quantensysteme entwickelt werden. Parallel ist geplant, die Aktivitäten rund um das eigentliche Halbleiter-Bauelement qualitativ auszubauen. Im Zentrum stehen weitere Schritte bei GaAs-basierten photonisch-integrierten Schaltkreisen. Diese enthalten neben der eigentlichen, lichterzeugenden Struktur weitere funktionale Elemente, die der Strahlkonditionierung oder -manipulation dienen. Ein weiterer Schwerpunkt sind passive Bauelemente wie etwa Wellenleiter, mit denen verschränkte Photonen erzeugt werden können.

Langjähriges Know-how bei Lasermodulen für Weltraumanwendungen

Das FBH verfügt über umfangreiche Erfahrungen aus diversen, DLR-geförderten Verbundvorhaben, in denen komplexe mikrointegrierte Lasermodule für den Einsatz in quantenoptischen Experimenten entwickelt und realisiert wurden. Mit diesen wurden Ensembles ultrakalter Rubidium- und Kalium-Atome an Bord von Höhenforschungsraketen erzeugt. In drei Raketen-Missionen demonstrierte das FBH mit insgesamt zehn Lasermodulen erfolgreich den Einsatz seiner Technologie. Auf dieser Grundlage soll nun in einer Kooperation mit der NASA eine Apparatur entwickelt werden, die quantenoptische Experimente mit ultra-kalten Atomen an Bord der internationalen Raumfahrtstation ermöglicht. In derartigen Weltraumprojekten profitiert das FBH auch von den langjährigen Erfahrungen bei der Entwicklung von Pumplasern für Satelliten des European Data Relay Systems, siehe auch S. 25.

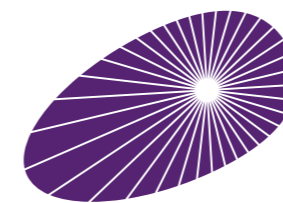
Im Mai 2017 startete das erste von drei vom BMBF geförderten Pilotprojekten *Optische Einzelionenuhr für Anwender (optIclock)*, an dem auch das FBH beteiligt ist. Im Projekt soll eine neue Generation von kompakten optischen Atomuhren erforscht und ein Demonstrator entwickelt werden, der auf einem einzelnen Ytterbium-Ion beruht. Diese Art von Uhr gehört zu den heute genauesten weltweit demonstrierten Frequenzstandards. Bislang können derartige Uhren nur in Speziallaboren unter exakt definierten Bedingungen betrieben werden – künftig sollen sie portabel werden. Das FBH entwickelt den dafür benötigten frequenzstabilisierten Diodenlaser, der den Uhrenübergang spektroskopiert.



Micro-integrated ECDL-MOPA to be used in the JoKaRUS experiment. Mikrointegrierter ECDL-MOPA, der im JoKaRUS-Experiment eingesetzt wird.

Zudem soll im zweiten Quartal 2018 im Rahmen des Vorhabens *JoKaRUS* ein weiterer FBH-Diodenlaser an Bord einer Höhenforschungsrakete getestet werden. Dieser wird für eine hochpräzise, Jod-basierte optische Frequenzreferenz genutzt. Das dafür verwendete Diodenlaser-Modul nutzt ein MOPA-Konzept, bei dem die Strahlung eines monolithischen Master Oszillators (MO) mithilfe eines Halbleiterverstärkers (PO) nachverstärkt wird. Ein schmalbandiger Extended Cavity Diode Laser wird dabei als MO eingesetzt.

Advanced UV for Life



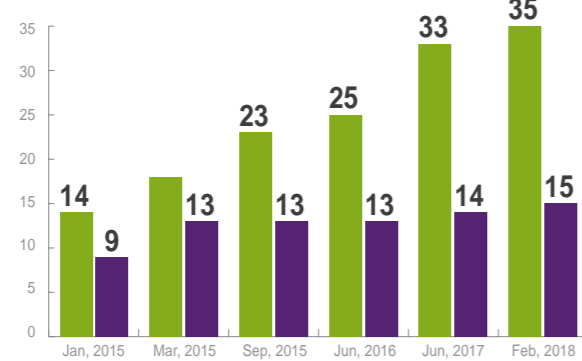
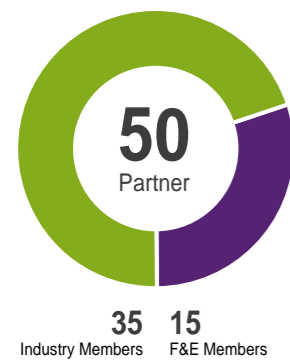
ADVANCED UV FOR LIFE

Advanced UV for Life is one of the most comprehensive and successful collaborations at the Ferdinand-Braun-Institut. It deals with the entire value chain of UV technology, from the development of innovative UV light-emitting diodes to their real-world application. The Institute is involved in many collaborative projects, some of them in a leading role. FBH Director Günther

Tränkle is the spokesperson for the consortium. The diverse activities of *Advanced UV for Life* are managed by the Coordination Office in the Science Management Department. Additionally, the field of semiconductor technologies and components is coordinated by the Ferdinand-Braun-Institut – involving in particular the Materials Technology Department and the Joint Lab GaN Optoelectronics, which is jointly operated by FBH and TU Berlin.

Advanced UV for Life brings together the expertise and the range of activities of partners who develop ultraviolet light emitting diodes (UV LEDs) and translate them into applications. These developments are aimed at producing powerful UV LEDs and marketing them for a wide range of applications. As key components, UV LEDs are ideal for solving pressing global problems. Ultraviolet radiation has an immense variety of application areas, including prevention and therapy in medicine; disinfection and sterilization of water, air and surfaces;

for increasing crop yields; detecting pathogens; monitoring the concentration of harmful substances in the atmosphere; and curing plastics, for example, in 3D printing and light-weight construction.



With strong focus on industry – the development of *Advanced UV for Life* in recent years. Starker Fokus auf der Industrie – die Entwicklung von *Advanced UV for Life* in den letzten Jahren.

Well positioned for the future

The Consortium, supported by the Federal Ministry of Education and Research, has undergone impressive development since its foundation. *Advanced UV for Life* was launched in 2013 with 23 partners; now it comprises 50 partners and has intensified its focus on applications and industry. Originally, there were about the same number of members from research and industry; today about 70 % are companies. Projects such as *UVPower* launched in 2017 under the leadership of Osram Opto Semiconductors underscore this trend. The aim is to develop high-performance UV LEDs for the mass market. Sample light-emitting diodes and a technology for producing LEDs for the UVB and UVC spectral range based on an aluminum-gallium nitride (AlGaIn) material system are to be available by 2020. With this project, the partners aim to significantly increase their presence and the Consortium's standing on the international market.



UV LED module for plant irradiation in operation at the research partner IGZ. UV-LED-Modul zur Pflanzenbestrahlung im Einsatz beim Forschungspartner IGZ.

At the same time, cooperation has expanded with research partners such as the Leibniz Institute for Vegetable and Ornamental Crops (IGZ). Highly specialized modules for irradiating plants with UV light have been developed to boost the plants' production of health-promoting substances during growth. The IGZ contributed its comprehensive know-how in plant breeding, while the Ferdinand-Braun-Institut developed tailored UV LEDs with the required specifications. FBH also designed and manufactured various irradiation modules with adjustable irradiation intensities and lengths – most recently to include LEDs with new wavelengths for irradiating the plants even more targetedly. For further details, see p. 56.

Advanced UV for Life

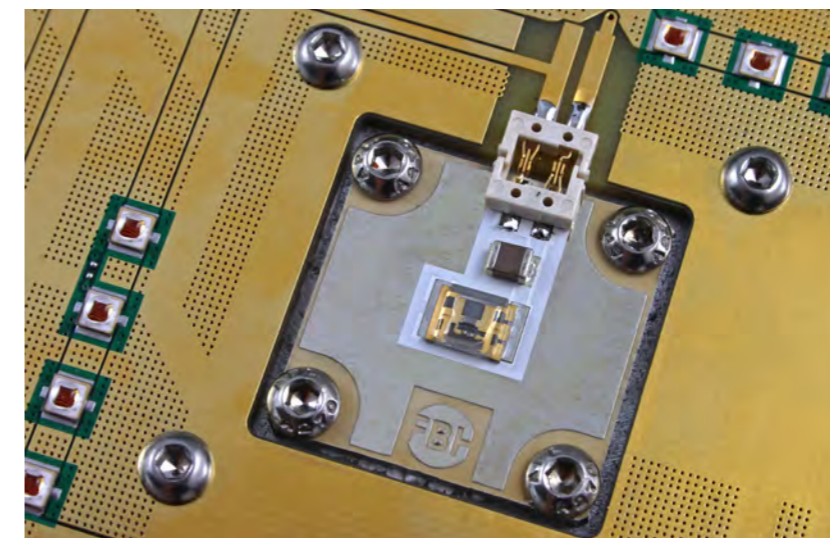
Advanced UV for Life ist eine der umfassendsten und erfolgreichsten Kooperationen am Ferdinand-Braun-Institut. Sie beschäftigt sich in der UV-Technologie mit der kompletten Wertschöpfungskette von der Entwicklung von neuartigen UV-Leuchtdioden bis hin zur konkreten Anwendung. Das Institut ist fachlich in viele der Verbundprojekte, teils federführend, eingebunden. FBH-Direktor Günther Tränkle repräsentiert das Konsortium als Sprecher, die am Department Wissenschaftsmanagement angesiedelte Koordinationsstelle leitet die vielfältigen Aktivitäten von *Advanced UV for Life*. Darüber hinaus wird das Arbeitsfeld Halbleitertechnologien und Bauelemente durch das Ferdinand-Braun-Institut koordiniert – involviert sind insbesondere das Department Materialtechnologie und das Joint Lab GaN Optoelectronics, das von FBH und TU Berlin gemeinsam betrieben wird.

Advanced UV for Life bündelt die Expertise und das Leistungsspektrum von Partnern, die ultraviolette Leuchtdioden (UV-LEDs) entwickeln und in Applikationen überführen. Die Entwicklungen zielen darauf, leistungsfähige UV-LEDs für vielfältige Anwendungen verfügbar zu machen und zu vermarkten. Als Schlüsselkomponenten eignen sich UV-LEDs ideal zur Lösung drängender globaler Probleme. Ultraviolette Strahlung kann vielfältig eingesetzt werden, unter anderem zur Prävention und Therapie in der Medizin, zur Desinfektion und Entkeimung von Wasser, Luft und Oberflächen, zur Erhöhung des Ertrages von Nutzpflanzen, zum Nachweis von Krankheitserregern, zur Überwachung der Konzentration von Schadstoffen in der Atmosphäre und zur Härtung von Kunststoffen, beispielsweise im 3D-Druck und im Leichtbau.

Gut aufgestellt für die Zukunft

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Konsortium hat seit seiner Gründung eine beeindruckende Entwicklung genommen. 2013 ist *Advanced UV for Life* mit 23 Partnern gestartet, heute zählt es 50 Partner und hat sich verstärkt in Richtung Anwendung und Industrie ausgerichtet. Ursprünglich stammten etwa gleich viele Einrichtungen aus Forschung und Industrie, heute kommen etwa 70 % der Mitglieder aus Unternehmen. Projekte wie das 2017 gestartete *UVPower* unter Leitung von Osram Opto Semiconductors unterstreichen diese Entwicklung. Hierbei sollen hochleistungsfähige UV-LEDs für den Massenmarkt entwickelt werden. Muster-Leuchtdioden und eine Technologie zur Fertigung der LEDs für den UV-B- und UV-C-Spektralbereich auf Basis des Materialsystems Aluminiumgalliumnitrid (AlGaIn) sollen bis 2020 vorliegen. Mit dem Projekt wollen die Partner ihre Präsenz auf dem internationalen Markt und die Schlagkraft des Konsortiums wesentlich erhöhen.

Parallel wurden die Kooperationen mit Forschungspartnern wie dem Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) ausgebaut. Hochspezialisierte Module zur Pflanzenbestrahlung mit UV-Licht wurden weiterentwickelt, um verstärkt gesundheitsfördernde Pflanzenstoffe beim Wachstum zu bilden. Das IGZ brachte dabei sein umfassendes Know-how bei der Pflanzenzucht ein, während das Ferdinand-Braun-Institut die maßgeschneiderten UV-LEDs mit den benötigten Spezifikationen entwickelte. Das FBH konstruierte und fertigte zudem verschiedene Bestrahlungsmodule mit einstellbaren Bestrahlungsintensitäten und -längen – zuletzt auch mit LEDs weiterer Wellenlängen, um Pflanzen noch zielgerichteter bestrahlen zu können. Weitere Details dazu siehe S. 57.



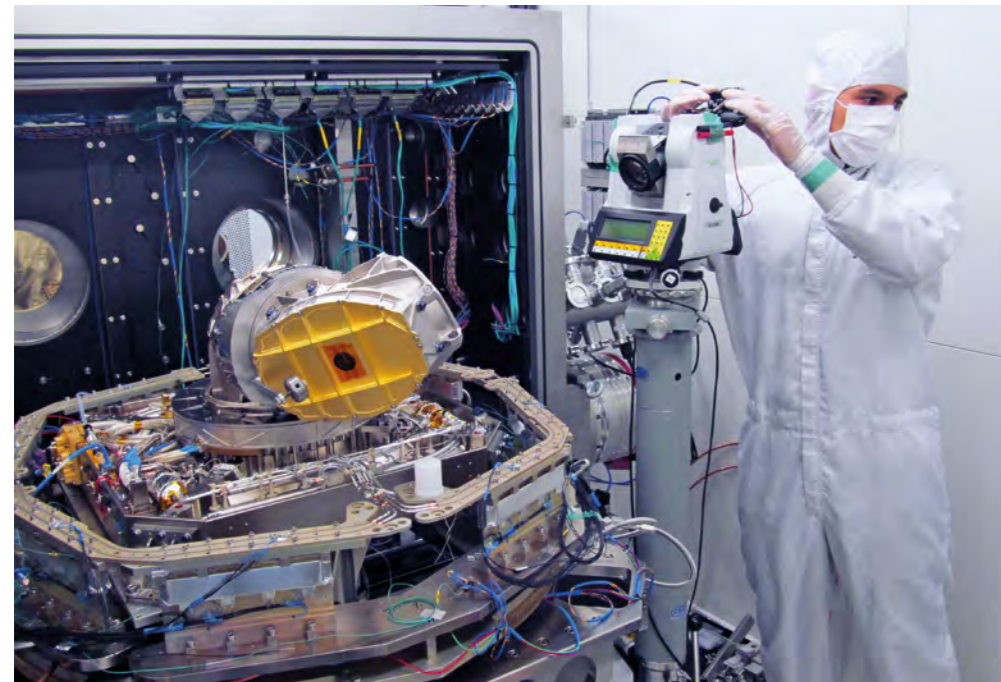
Capped UVB LED for use in a plant irradiation module. UV-B-LED mit Deckel für den Einsatz in einem Modul zur Pflanzenbestrahlung.

Unique developments keep up the competitiveness

Whether regional, national or international, FBH's developments are aimed at continually providing its industry and research partners with useful, efficient components. In this way, the Institute makes a significant contribution to strengthening Germany's technological sovereignty in laser technology and microelectronics among the international competition.

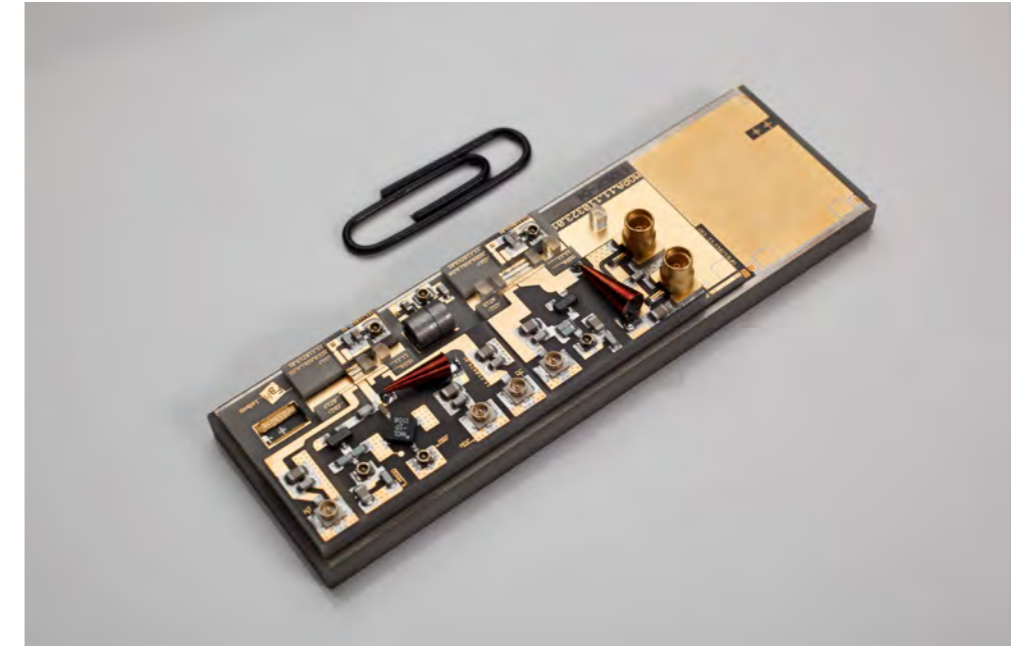
Tough space applications

The long-standing cooperation with Tesat-Spacecom is one such successful model. The Ferdinand-Braun-Institut develops particularly robust and powerful pump laser sources for the space company. These sources are one of the central components for Tesat-Spacecom's latest generation of laser communication terminals (LCT) and are used in the European Data Relay Satellite System (EDRS) – a kind of data highway in space. This European satellite system, backed by the European Space Agency ESA, has data relay satellites placed in geostationary orbit to serve effectively as transmitters. They distribute data, forwarding them to and from distant satellites, unmanned aerial vehicles, or fixed stations on Earth. The current generation of LCTs support data rates of several Gbit/s over distances of up to 80,000 kilometers. Thus, they allow continuous transmission and reception of data – for transmitting large volumes of data with no delay. One important application of this is real-time earth observation of acute catastrophes such as earthquakes, floods or shipwrecks, where the extent of damage can be assessed and relief workers directed to the right location. The system also serves for remote sensing via satellite to collect data for environmental and climate protection purposes.



☛ Integration and testing of a Laser Communication Terminal (LCT) in Tesat-Spacecom's clean room. Integration und Test eines Laser-Kommunikationsterminals (LCT) im Reinraum von Tesat-Spacecom.

The EDRS system, which is entirely under European control, is already operating successfully in its first expansion stage, and will next be completed in successive stages. As always, FBH's diode laser benches, which are qualified according to ESA standards and have proven their reliability in space on many satellites, are on board. These work reliably even under the harsh environmental conditions of space, such as cosmic radiation and strong temperature fluctuations. FBH is currently redeveloping its pump lasers to include a sophisticated wavelength stabilization system in the chip. This will increase their reliability even further and reduce interference from noise signals. In its Joint Lab Laser Metrology, FBH has also been successfully developing and testing laser modules for many years for conducting challenging physics experiments in space. With this comprehensive expertise, FBH has established itself as a permanent cooperation partner for a large diversity of space applications.



☛ With this diode laser module, a Bose-Einstein condensate of rubidium atoms was generated for the first time in space onboard a sounding rocket. Mit diesem Diodenlaser-Modul wurde weltweit erstmalig im Weltraum ein Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidium-Atomen auf einer Höhenforschungsrakete erzeugt.

Tailor-made developments for industry

Not only for use in space, with its very special requirements, but in numerous other applications as well, FBH has established itself as the first port of call for customized developments based on III-V semiconductors. FBH has developed a special array of diode lasers suitable for precise surface detection, for example with 3D scanners. Its winning characteristics are particularly small dimensions, high conversion efficiency and high spectral purity. The basic R&D work is already concluded and the first pilot run was a success. Production is scheduled for February 2018. This will provide the commissioning company with the key component for its miniaturized interferometric systems. Eight AlGaAs-based diode lasers are arranged on a 2.5 x 3 mm² array with defined spacing. Optical surface gratings act as Bragg reflectors to constrain the laser to the necessary narrow linewidth and maintain defined spectral distances between the diode lasers.

Einzigartige Entwicklungen sichern Wettbewerbsfähigkeit

Ob regional, national oder international, das FBH zielt mit seinen Entwicklungen auf die dauerhafte Versorgung seiner Partner aus Industrie und Forschung mit leistungsfähigen, nutzbaren Komponenten. Damit trägt das Institut wesentlich dazu bei, die Technologie-souveränität Deutschlands in der Lasertechnologie und der Mikroelektronik im internationalen Wettbewerb zu stärken.

Anspruchsvolle Weltraumanwendungen

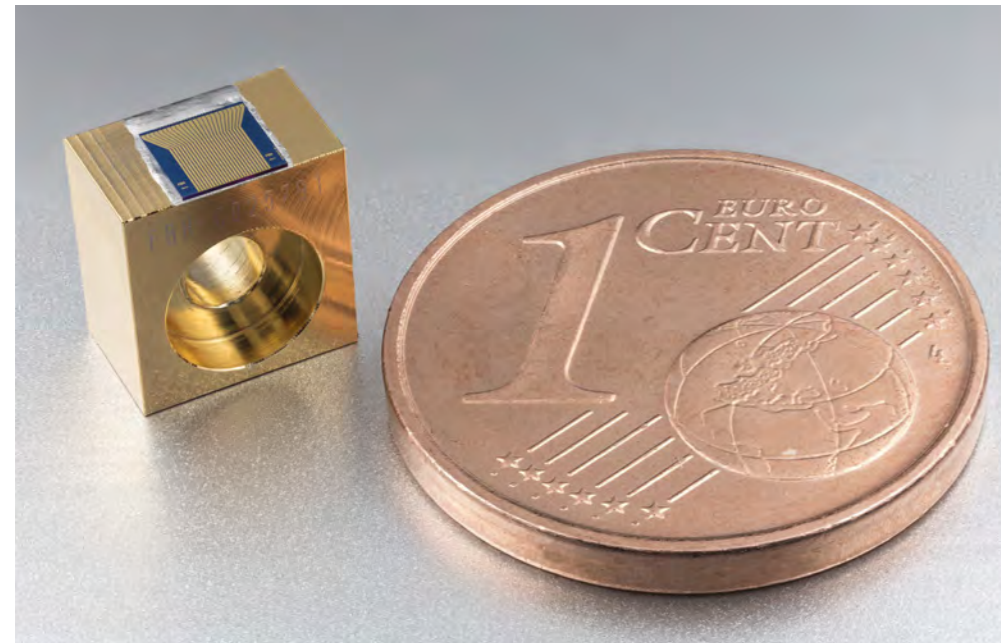
Die langjährige Zusammenarbeit mit Tesat-Spacecom ist ein solches Erfolgsmodell. Für das Unternehmen entwickelt das Ferdinand-Braun-Institut besonders robuste und leistungsfähige Pumplaserquellen. Sie sind eine der zentralen Komponenten für die neueste Generation der Laser-Kommunikationsterminals (LCT) von Tesat-Spacecom und kommen im European Data Relay Satellite System (EDRS) zum Einsatz – einer Art Datenhighway im All. Bei diesem europäischen Satellitensystem, das von der Europäischen Weltraumorganisation ESA unterstützt wird, werden Datenrelaissatelliten als Art Vermittler im geostationären Orbit platziert. Sie verteilen Daten, leiten sie von und zu weiter entfernten Satelliten, unbemannten Luftfahrzeugen oder festen Stationen auf der Erde weiter. Die aktuelle LCT-Generation ermöglicht Datenraten von mehreren Gbit/s über Distanzen von bis zu 80.000 Kilometern. Auf diese Weise können permanent Daten empfangen und gesendet werden – große Datenmengen werden so ohne Verzögerung übertragen. Wichtig ist eine derartige Echtzeit-Erdbeobachtung gerade bei akuten Katastrophen wie etwa Erdbeben, Hochwasser oder Schiffshavarien, etwa um das Ausmaß der Schäden einzuschätzen und Hilfskräfte an

die richtigen Orte zu leiten. Für die Fernerkundung via Satellit liefert das System Daten für den Umwelt- und Klimaschutz.

Das EDRS-System, das vollständig unter europäischer Kontrolle steht, läuft in der ersten Ausbaustufe bereits erfolgreich und wird nun sukzessive vervollständigt. Mit an Bord sind stets die nach den Standards der ESA qualifizierten Diodenlaser-Benches aus dem FBH, die ihre Zuverlässigkeit im Weltraum auf mehreren Satelliten unter Beweis gestellt haben. Sie arbeiten zuverlässig selbst unter den rauen Umgebungsbedingungen im All, wie etwa Weltraumstrahlung oder hohen Temperaturschwankungen. Aktuell entwickelt das FBH seine Pumplaser mit einer ausgeklügelten Wellenlängenstabilisierung weiter, die in den Chip implementiert wird. Sie erhöht die Zuverlässigkeit weiter und reduziert störende Rauschsignale. Auch mit seinem Joint Lab Laser Metrologie entwickelt und testet das FBH seit vielen Jahren erfolgreich Lasermodule für anspruchsvolle fundamentalphysikalische Untersuchungen im Weltraum. Dank dieses umfassenden Know-hows hat sich das FBH inzwischen als fester Kooperationspartner für verschiedenste Weltraumanwendungen etabliert.

Maßgeschneiderte Entwicklungen für die Industrie

Nicht nur für den Einsatz im Weltraum mit seinen ganz besonderen Anforderungen, sondern in zahlreichen weiteren Anwendungen hat sich das FBH als erste Adresse für maßgeschneiderte Entwicklungen auf der Basis von III/V-Halbleitern etabliert. So hat das FBH ein spezielles Array aus Diodenlasern entwickelt, das sich unter anderem für die präzise Oberflächendetektion – etwa mit 3D-Scannern – eignet. Es zeichnet sich durch besonders kleine Abmessungen, eine hohe Konversionseffizienz und hohe spektrale Reinheit aus. Die grundlegenden F&E-Arbeiten sind inzwischen abgeschlossen und ein erster Vorfeld-Fertigungsrun wurde erfolgreich durchgeführt. Im Februar 2018 ist nun der erste Fertigungsrun geplant. Damit steht dem beauftragenden Unternehmen die zentrale Komponente für dessen miniaturisierte interferometrische Systeme zur Verfügung. Acht AlGaAs-basierte Diodenlaser werden dabei mit definierten räumlichen Abständen auf einem $2.5 \times 3 \text{ mm}^2$ großen Array angeordnet. Optische Oberflächengitter, die als Bragg-Reflektoren wirken, sorgen für die erforderliche geringe Linienbreite und für definierte spektrale Abstände zwischen den Diodenlasern.



Array with distributed Bragg reflector diode lasers for precise surface detection.

Array mit Distributed-Bragg-Reflector-Diodenlasern für die präzise Oberflächendetektion.

Putting research to use – targeted device developments for industry

Access to innovative research results is of vital importance for companies who want to survive in the competitive high-tech market. Even then, in most cases, companies still have to develop the results further to make sure they apply to their own applications – an obstacle for many of them. This is why FBH founded its Prototype Engineering Lab in 2014, to ensure promising results with good opportunities for exploitation do not simply end up in the drawer. As an interface between research and industry, the Lab takes sought-after or promising R&D results and develops them into functional devices that can be easily tested using standard interfaces. Test runs can also be organized or performed directly at FBH for verification purposes, for example determining how UV LEDs can best be used for disinfection in a specific case. This helps to clarify fundamental questions in the lead-up to device development: How many UV LEDs are needed, and in what arrangement, to disinfect a certain amount of a substance? What wavelength is most suitable for a given application?



All-in-One-Puls laserquelle, die ultrakurze Lichtimpulse in einem einstellbaren Zeitbereich von 5 bis 15 ps mit frei wählbaren Folgefrequenzen vom Hertz- bis in den Megahertz-Bereich liefert.

All-in-one pulse laser source delivering ultra-short light pulses within an adjustable time range of 5–15 ps with flexibly selectable repetition frequencies from the hertz to megahertz range.

Small companies, in particular, often do not have the necessary resources and steer clear from developmental costs for prototypes or small batches. The Prototype Engineering Lab is therefore an important point of contact for small and medium-sized enterprises (SMEs), especially as a place where innovative product ideas can be brought to market maturity. By supporting the rapid launch of new products – often for highly specialized applications and in niche markets – FBH helps companies to secure a competitive edge. FBH, in turn, gets to transfer its R&D results, and benefits from sustainable cooperation with the companies.

Involvement in early-stage R&D

Together with the labs and departments, research topics are identified that are particularly suitable for technology transfer. Just recently, a potential-free probe designed at FBH was developed to maturity, and an SME has begun marketable product development. The resulting probe tip can be used, among other things, for performing tests in automotive engine compartments. The FBH technology is being licensed for this very purpose. More details can be found on p. 58.

The Prototype Engineering Lab participates in research projects right from the start. The engineering team created and successfully demonstrated, for example, part of a complex control system for a laser system in space. This digital component will next be expanded into a flexible laser controller for diverse applications. Several irradiation modules have also been developed for plant breeding in cooperation with the Leibniz Institute for Vegetable and Ornamental Crops (IGZ). Plants are irradiated with various wavelengths of light to stimulate

the formation of health-promoting substances, known as secondary metabolites. A picosecond light source is also being continually refined. It delivers ultra-short pulses – either as a single pulse or in a burst of several consecutive pulses – at an adjustable duration from 5 to 15 ps with freely selectable repetition frequencies on the order of hertz to megahertz. Both the diode lasers and the entire electronic control system were developed at FBH, and can be easily integrated into a wide variety of laser systems via computer control.

The Prototype Engineering Lab is currently working on a “laser kit” that can be used for constructing and controlling various FBH pulsed diode lasers in a modular and flexible manner. Wherever possible, components are standardized in order to create synergies and still be able to operate the various lasers optimally. The aim is to reduce the time required for setup and to be able to respond quickly to requests for FBH diode lasers with pulsed electronics drivers.

Forschung nutzbar machen – gezielte Geräteentwicklungen für die Industrie

Der Zugriff auf innovative Forschungsergebnisse ist für Unternehmen, die im wettbewerblichen Hochtechnologie-Markt bestehen wollen, von zentraler Bedeutung. Meist sind jedoch Weiterentwicklungen notwendig, um die Ergebnisse in den eigenen Applikationen testen zu können – eine Hürde für viele Unternehmen. Damit vielversprechende Ergebnisse trotz guter Verwertungschancen nicht in der Schublade landen, hat das FBH 2014 sein Entwicklungszentrum gegründet. Als Schnittstelle zwischen Forschung und Industrie entwickelt das Lab nachgefragte oder erfolgversprechende F&E-Ergebnisse zu funktionsfähigen Geräten weiter, die mit Standardschnittstellen einfach zu erproben sind. Auch Testreihen zur Verifikation können organisiert oder direkt am FBH durchgeführt werden, etwa wie UV-LEDs zur Desinfektion am besten in einer bestimmten Anwendung eingesetzt werden. Das hilft, grundlegende Fragestellungen bereits im Vorfeld der Geräteentwicklung zu klären: Wie viele UV-LEDs werden in welcher Anordnung zur Bestrahlung benötigt, um eine bestimmte Menge einer Substanz zu desinfizieren? Welche Wellenlänge ist optimal für eine spezifische Anwendung geeignet?

Gerade kleinere Firmen haben häufig nicht die nötigen Ressourcen und scheuen Entwicklungskosten für Prototypen oder kleine Stückzahlen. Das Entwicklungszentrum ist daher gerade für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) eine wichtige Anlaufstelle, um innovative Produktideen so weit voranzutreiben, dass sie auf den Markt gebracht werden können. Durch die Unterstützung bei der frühzeitigen Markteinführung von neuen Produkten – häufig für hochspezialisierte Anwendungen und in Nischenmärkten – hilft das FBH Unternehmen, sich Wettbewerbsvorteile zu sichern. Das FBH wiederum kann seine F&E-Ergebnisse transferieren und profitiert von der nachhaltigen Zusammenarbeit mit den Firmen.

Frühzeitig in F&E eingebunden

Gemeinsam mit den Labs und Departments werden Forschungsthemen ermittelt, die sich besonders für den Technologietransfer eignen. Erst kürzlich wurde ein am FBH entworfener potentialfreier Tastkopf so weiterentwickelt, dass ein KMU nun mit der markttauglichen Produktentwicklung beginnt. Die entstehende Tastspitze kann unter anderem bei Untersuchungen im Kfz-Motorraum eingesetzt werden. Die FBH-Technologie wird dafür lizenziert. Weitere Details gibt es auf S. 59.

Das Entwicklungszentrum wird dabei von Anfang an in Forschungsprojekte eingebunden. So hat das Ingenieursteam beispielsweise einen Teil einer komplexen Steuerung für ein Lasersystem im Weltraum realisiert und erfolgreich demonstriert. Diese digitale Komponente soll zukünftig zu einer flexiblen Lasersteuerung für verschiedene Anwendungen ausgebaut werden. In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) wurden zudem mehrere Bestrahlungsmodule für die Pflanzenzucht entwickelt. Pflanzen werden dabei mit Licht verschiedenster Wellenlängen bestrahlt, um diese gezielt zur Bildung gesundheitsfördernder Pflanzenstoffe, sogenannter Sekundärmetabolite, anzuregen. Auch eine Pikosekunden-Lichtquelle wird stetig weiterentwickelt. Sie liefert ultra-kurze Pulse – vom Einzelpuls bis zu mehreren aufeinander folgenden Pulsen (burst mode) – in einem einstellbaren Zeitbereich von 5 bis 15 ps mit frei wählbaren Folgefrequenzen vom Hertz- bis in den Megahertz-Bereich. Sowohl die Diodenlaser als auch die komplette elektro-



Software developed by the Prototype Engineering Lab for plant irradiation, allowing individual adjustment of irradiation cycles of different LEDs. Speziell entwickelte Software aus dem Entwicklungszentrum für die Pflanzenbestrahlung, mit der Bestrahlungszyklen verschiedener LEDs individuell eingestellt werden können.

nische Ansteuerung wurden am FBH entwickelt, per Computersteuerung kann sie einfach in verschiedenste Lasersysteme integriert werden.

Aktuell arbeitet das Entwicklungszentrum an einem „Laserbaukasten“, mit dem verschiedene gepulste Diodenlaser des FBH angesteuert und ebenso modular wie flexibel aufgebaut werden können. Komponenten werden möglichst vereinheitlicht, um Synergien zu schaffen und die verschiedenen Laser dennoch optimal betreiben zu können. Ziel ist es, den Zeitaufwand beim Aufbau zu reduzieren und Nachfragen nach FBH-Diodenlasern mit Steuerung schnell bedienen zu können.

Application Laboratory “III-V Components for Laser Technology and Electronics”

For many years, FBH has been successfully translating its research results into industrial use, most of all for companies in Berlin and Brandenburg. Thus, it has established comprehensive expertise in this area. Within the Application Laboratory “III-V Components for Laser Technology and Electronics”, FBH intends to increase the maturity level of its existing technologies and thus steer its range of activities even more strongly in the direction of industrial applications. From October 2017 to the end of 2020, a total of 4.62 million euros in funding from the European Regional Development Fund (ERDF) will go to FBH.

The project includes investments to expand the technological infrastructure as well as semiconductor technology runs to break in the facilities and increase process stability. One aspect will be expanding the epitaxy base with a multi-wafer reactor for GaAs laser diodes and the corresponding analysis technology. Another issue will be developing advanced semiconductor processes for GaAs lasers and for GaN and InP electronics. Yet another aspect will be increasing the digitization of the cleanroom. This means converting the process control and data acquisition systems to electronic versions. Also being expanding is the mounting and assembly technology for laser diodes and electronic chips.

Applikationslabor „III/V-Komponenten für Lasertechnik und Elektronik“

Seit vielen Jahren transferiert das FBH seine Forschungsergebnisse erfolgreich an Unternehmen der Wirtschaft, insbesondere in Berlin und Brandenburg. Auf diese Weise hat es eine umfassende Kompetenz in diesem Bereich etabliert. Im Rahmen des Applikationslabors

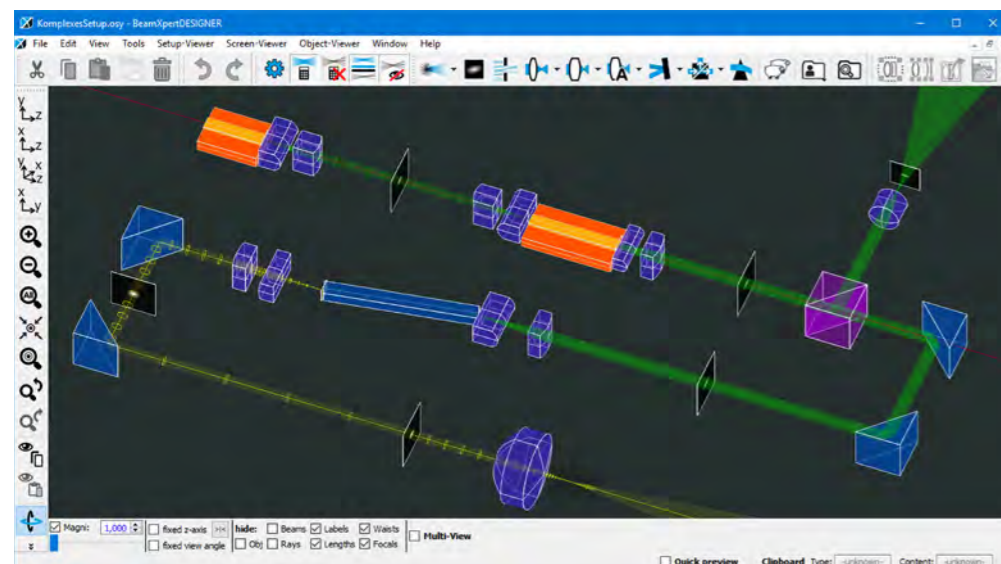
„III/V-Komponenten für Lasertechnik und Elektronik“ soll nun der Reifegrad der verfügbaren Technologien erhöht und damit das Leistungsspektrum des FBH noch stärker in Richtung der industriellen Anwendung entwickelt werden. Von Oktober 2017 bis Ende 2020 fließen insgesamt 4,62 Millionen Euro Fördermittel aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) an das FBH.

Das Projekt umfasst sowohl Investitionen zum Ausbau der technologischen Infrastruktur als auch Halbleiter-Technologie-Runs, um die Anlagen einzufahren und die Stabilität der Prozesse zu erhöhen. Zum einen soll die Epitaxie-Basis mit einem Multi-Wafer-Reaktor für GaAs-Laserdioden und der zugehörigen Analysetechnik erweitert werden. Zum anderen werden Halbleiterprozesse für GaAs-Laser sowie für die GaN- und InP-Elektronik weiterentwickelt. Außerdem soll die Digitalisierung des Reinraums vorangetrieben werden. Dazu werden die Prozesssteuerung und Datenerfassung auf eine elektronische Version umgestellt. Hinzu kommt der Ausbau der Aufbau- und Verbindungstechnik für Laserdioden und Elektronik-Chips.

Eleventh spin-off: BeamXpert

With BeamXpert, FBH has spun off its eleventh spin-off. Under the working title “DOBSY – Designer for Optical Beam Systems”, Bernd Eppich and Guido Mann received funding through an EXIST start-up grant from March 2017 to February 2018. BeamXpert is further supported by the Leibniz Association’s Leibniz-Transfer program. The company was formally established as a limited liability company in December 2017 and has since received two awards: second place in the Berlin-Brandenburg Business Plan Competition (final round) in July 2017, and first place in the “Founder Competition – Digital Innovations” in September 2017.

Laser light is an indispensable tool for applications such as materials processing, metrology, medical technology, and R&D. In each case, the properties of the laser radiation must be precisely tailored to the respective application. For this purpose, the FBH spin-off BeamXpert GmbH is developing the optical simulation program *BeamXpertDESIGNER* for rapid and precise design of optical laser beam shaping systems using two complementary modelling approaches. Apart from this unique selling point, users are guaranteed to learn the program quickly, with its intuitive interface similar to other well-known CAD programs. The results, which conform to laser standards, are calculated in real time and displayed in three dimensions. This user-friendly program can thus greatly speed up the workflow for its operators.



BeamXpertDESIGNER makes it easy to simulate beam propagation in complex laser systems. Mit BeamXpertDESIGNER lässt sich die Strahlpropagation in komplexen Lasersystemen einfach simulieren.

Elftes Spin-off: BeamXpert



Mit BeamXpert hat das FBH sein insgesamt elftes Spin-off ausgegründet. Unter dem Arbeitstitel „DOBSY – Designer for Optical Beam Systems“ wurden Bernd Eppich und Guido Mann durch ein EXIST-Gründerstipendium von März 2017 bis Februar 2018

gefördert. Weitere Unterstützung erfährt BeamXpert durch Leibniz-Transfer der Leibniz-Gemeinschaft. Die formale Unternehmensgründung als GmbH erfolgte im Dezember 2017. Das Vorhaben wurde zwischenzeitlich bereits zweifach ausgezeichnet: mit dem 2. Platz beim Businessplan-Wettbewerb Berlin-Brandenburg (Finalrunde) im Juli 2017 und als Preisträger beim „Gründerwettbewerb – Digitale Innovationen“ im September 2017.

Laserlicht ist ein unverzichtbares Werkzeug, das in Anwendungen wie der Materialbearbeitung, Mess- und Medizintechnik sowie in F&E genutzt wird. Die Eigenschaften der Laserstrahlung müssen dabei passgenau auf die jeweilige Applikation zugeschnitten werden. Zu diesem Zweck entwickelt die FBH-Ausgründung BeamXpert GmbH das Optiks simulationsprogramm *Beam XpertDESIGNER*, mit dem optische Laserstrahlungssysteme durch zwei sich ergänzende Modellierungsansätze schnell und exakt ausgelegt werden können. Neben diesem Alleinstellungsmerkmal bietet das Programm eine intuitive Bedienoberfläche, die eine kurze Einarbeitungszeit garantiert und sich an bekannte CAD-Programme anlehnt. Die lasernormgerechten Ergebnisse werden in Echtzeit berechnet und dreidimensional dargestellt. Verglichen mit anderen Softwareprodukten, lässt sich der Workflow der Anwenderinnen und Anwender damit signifikant beschleunigen.

YELLOW – hybrid laser light sources for new analytics applications in medicine and biology

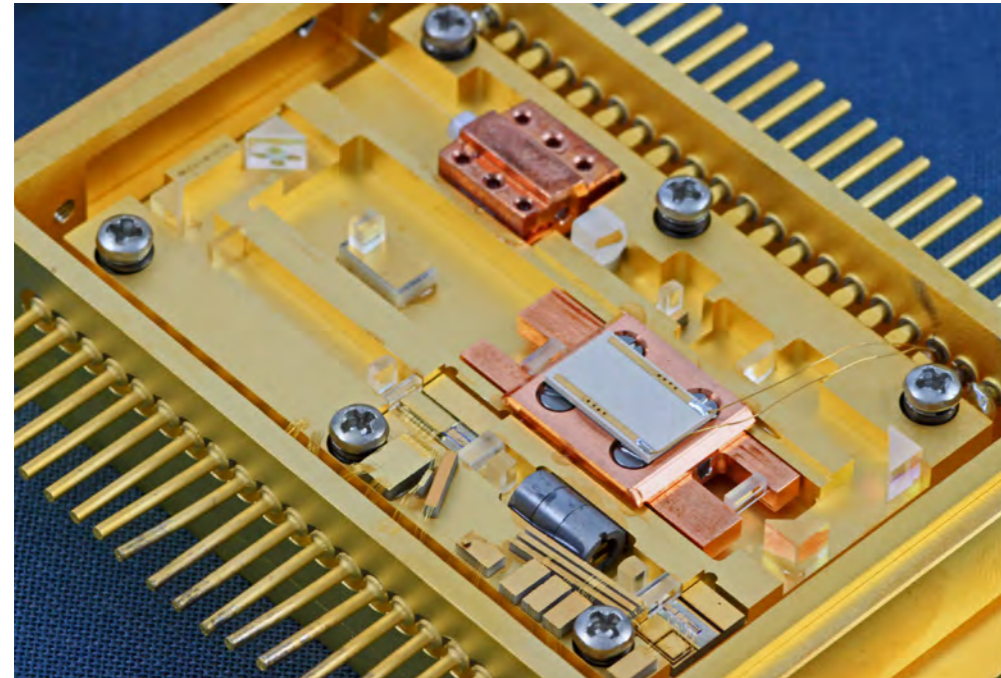
The InnoProfile transfer initiative *YELLOW* has successfully developed highly efficient, compact laser modules for excitation of substances in the yellow wavelength range at 561 nm, 577 nm, and 589 nm. With this project now complete, a flexible modular system is available for various applications in analytics. Free choice of center wavelength and tunability in the range of 2 nm are decisive advantages of the recently developed laser systems over previous solutions.

The modules, which are only about half the size of a mobile phone, were created with the help of frequency doubling. This is where the wavelength from highly brilliant diode lasers, in the infrared spectral range from 1100 nm to 1180 nm, is halved using periodically polarized lithium niobate crystals. Among other things, FBH has succeeded in developing diode lasers with near-infrared wavelengths of 1122 nm and 1154 nm, which are difficult to achieve. These deliver 10 W of output power at high beam quality. The scientists were able to avoid limiting thermal effects in the crystal by revising the connection of the crystal. For example, more than 2 W of output power was achieved in the yellow spectral range at 561 nm, and 1.6 W at 577 nm. This is 10 times the power previously achieved.

The laser system, which is always adapted to the given application, is housed in a newly developed, compact butterfly package that can be used as a technology platform for current and future systems. The beam source thus responds to the trend towards miniaturization in material analysis, medical technology, and biology. Different applications need different laser operating modes. Environmental analysis, for example, calls for continuous wave lasers with highly stable output powers and modulation frequencies of about 10 MHz, while ophthalmology requires high output powers in excess of 1 W. Time-resolved fluorescence spectroscopy, in turn, requires short pulses. Development of the miniaturized laser modules with fiber output was carried out in close cooperation with small and medium-sized companies, which are testing and marketing these beam sources in their applications.

YELLOW – hybride Laserlichtquellen für neue medizintechnische und biologische Anwendungen in der Analytik

Im Rahmen der InnoProfile-Transfer-Initiative *YELLOW* wurden erfolgreich kompakte Lasermodule mit hoher Effizienz entwickelt, die Substanzen im gelben Wellenlängenbereich bei 561 nm, 577 nm und 589 nm anregen. Mit Projektabschluss steht nun ein flexibles Baukasten-System für verschiedene Anwendungen in der Analytik zur Verfügung. Die freie Wahl der Zentrumswellenlänge und Durchstimmbarkeit im Bereich von 2 nm sind entscheidende Vorteile der entwickelten Lasersysteme gegenüber bisherigen Lösungen.



➤ **Compact diode laser module for biophotonics applications developed within the framework of YELLOW.**

Kompaktes Diodenlasermodul für die Biophotonik, das im Rahmen von *YELLOW* entwickelt wurde.

Realisiert wurden die Module, die nur etwa halb so groß sind wie ein Handy, mithilfe der Frequenzverdoppelung. Dazu wird die Wellenlänge aus hochbrillanten Laserdioden im infraroten Spektralbereich von 1100 nm bis 1180 nm mithilfe von periodisch gepolten Lithiumniobat-Kristallen halbiert. Am FBH ist es unter anderem gelungen, Diodenlaser der schwer zugänglichen, nah-infraroten Wellenlängen 1122 nm und 1154 nm zu entwickeln. Sie liefern 10 W Ausgangsleistung bei hoher Strahlqualität. Durch eine überarbeitete Anbindung des Kristalls konnten limitierende thermische Effekte im Kristall vermieden werden. So wurden beispielsweise mehr als 2 W Ausgangsleistung im gelben Spektralbereich bei 561 nm und 1,6 W bei 577 nm erreicht. Dies ist das 10-fache der bisher erreichten Leistung.

Das jeweils an die Anwendung angepasste Lasersystem ist in einem neu entwickelten, kompakten Butterflygehäuse untergebracht, das als Technologieplattform für aktuelle und zukünftige Systeme genutzt werden kann. Damit entspricht diese Strahlquelle dem Trend zur Miniaturisierung in der Materialanalyse, der Medizintechnik und der Biologie. Je nach Applikation sind verschiedene Betriebsmodi der Laser gefragt: in der Umweltanalytik sind das Dauerstrichlaser mit hochstabilen Ausgangsleistungen und Modulationsfrequenzen von etwa 10 MHz, in der Augenheilkunde werden hohe Ausgangsleistungen über 1 W benötigt. Die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie wiederum erfordert kurze Pulse. Die Entwicklung der miniaturisierten Lasermodule mit Faserausgang, wurde in enger Abstimmung mit kleinen und mittelständischen Unternehmen durchgeführt, die diese Strahlquellen in ihren Anwendungen testen und vermarkten.

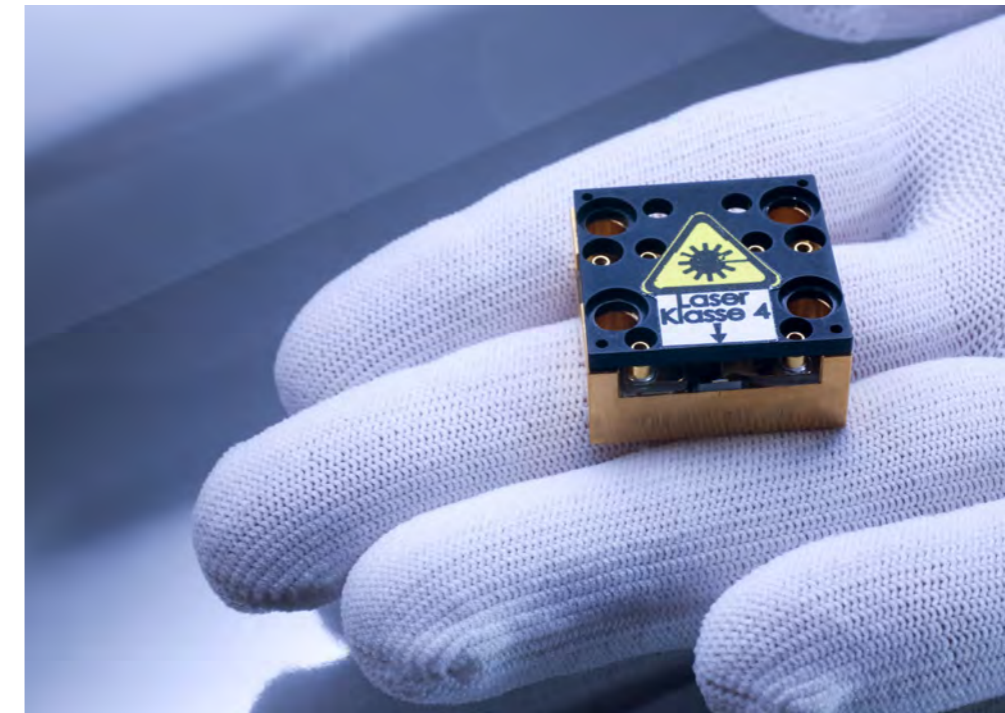
Greater precision in analysis – higher sensitivity and more accurate information

Frequency conversion is also important for tunable lasers used in a new analytical method of mid-infrared spectroscopy. This allows the detection wavelength to be 'shifted' into the near-infrared spectral range, which is easier to examine.

The strongest and most characteristic absorption bands for a given substance – in which electromagnetic radiation is selectively 'swallowed' on its way to the receiver – lie in the medium infrared spectral range. For each specific substance, these bands are as unique as a fingerprint. Accordingly, the presence of these substances can be detected by exciting them with light of a defined wavelength and measuring the amount of absorption of the radiation. Unfortunately, these wavelengths coincide with the ubiquitous thermal radiation in our environment. That means detection is often only possible with expensive and elaborately cooled semiconductor detectors.

In the project *Mid-TECH*, FBH has now developed highly tunable diode lasers that are particularly suited to biomedical sensor applications. They 'add' long-wave infrared light emitted at a defined excitation wavelength to the near-infrared light from the diode laser. Its emission is converted into short-wave light with the help of crystals used for frequency conversion. This new, higher-energy frequency is no longer in the mid-infrared range, rather in the visible or near-infrared range, in which silicon-based, compact and inexpensive detectors and cameras can be used. The latter can even be used for imaging spectroscopy.

If different substances are to be detected using a single system, then tunable lasers are needed. With these, the wavelength can be varied over a specific range and set successively to each absorption band of interest.



➤ **Widely tunable MOPA diode laser module.**
Weit durchstimmbares MOPA-Diodenlasermodul.

The right variant for the respective application

FBH follows two different approaches based on master oscillator power amplifier (MOPA) concepts – each offering its own advantages. One of the two variants from FBH's photonics research area is a Y-laser with integrated heater, which supplies two closely spaced wavelengths on one chip. This type of laser, based on surface gratings, is technologically uncomplicated to realize. The second, scientifically and technologically more interesting MOPA variant is based on special integrated gratings for wavelength selection, so-called 'sampled gratings'. The development of a specially adapted process made it possible for the first time to realize such GaAs-based

components. Both variants can be tuned over ranges of up to 20 nm – making them suitable for the desired applications. The emission of the respective lasers is then amplified in the region of several watts in a MOPA configuration.



High-power MOPA diode laser with tapered amplifier
Hochleistungs-MOPA-Diodenlaser mit Trapezverstärker.

Distinguished research in the international doctoral program

The *Mid-TECH* project integrates an international doctoral program with 15 young scientists from eight countries. Mahmoud Tawfiq studied physics and nanotechnology at the University of Denmark (DTU). At FBH, he is concentrating on tuning diode lasers for spectroscopic applications. He has already managed to tune them up to 23 nanometers. "If we modulate the wavelength of the diode laser during measurement, we get several images of the same sample – but at different infrared wavelengths. This imaging provides doctors with additional information about the tissue," the FBH PhD student explains. Typically, a given molecule will absorb some wavelengths of light more than others. The degree of variation is distinct for every type of molecule. That means the molecules can be traced during their reactions to reveal new information about cellular processes. Rapid-growing tumor cells, for example, consume more oxygen than healthy cells. The researchers are looking for a significant set of molecular signatures that will allow fast, clear, and locally very precise differentiation between healthy and tumorous tissue.

Mahmoud Tawfiq received several awards for his research in 2017; see also p. 51. It will still be a good few years down the line, though, before pathologists will be able to benefit from imaging mid-IR spectroscopy because the hurdles for medical applications are still very high. In environmental analysis, however, such as analyzing motor combustion gases or detecting gas leaks in pipelines, the method could be ready for operation in just a few years' time.

Mehr Präzision in der Analytik – höhere Empfindlichkeit und genauere Informationen

Um Frequenzkonversion geht es auch bei durchstimmbaren Lasern für eine neuartige Messmethode der Spektroskopie im mittleren Infrarot, die zur Analytik genutzt wird. Damit lässt sich die Detektionswellenlänge in den einfacher zu untersuchenden nah-infraroten Spektralbereich „verlagern“.

Die stärksten und für die jeweilige Substanz charakteristischen Absorptionsbanden – in denen elektromagnetische Strahlung auf dem Weg zum Empfänger selektiv „geschluckt“ wird – liegen im mittleren infraroten Spektralbereich. Sie sind für jede Substanz unverwechselbar wie ein Fingerabdruck. Um diese Stoffe nachzuweisen, kann man sie mit Licht einer definierten Wellenlänge anregen und die Absorption der Strahlung messen. Diese Wellenlängen überdecken sich allerdings mit der allgegenwärtigen Wärmestrahlung unserer Umge-

bung. Damit ist der Nachweis oft nur mit kostspieligen und aufwändig gekühlten Halbleiterdetektoren möglich.

Im Projekt *Mid-TECH* wurden am FBH nun weit durchstimmbare Diodenlaser entwickelt, die sich insbesondere für biomedizinische Sensorikanwendungen eignen. Sie „addieren“ das langwellige infrarote Licht, das auf der definierten Anregungswellenlänge emittiert wird, mit dem nah-infraroten Licht des Diodenlasers. Dessen Emission wird mithilfe von Kristallen zur Frequenzkonversion in kurzwelliges Licht umgewandelt. Die neue, energiereichere Frequenz liegt dadurch nicht mehr im mittleren Infrarotbereich, sondern im sichtbaren oder im nahen Infrarot. Dort können siliziumbasierte, kompakte und preiswerte Detektoren und Kameras genutzt werden. Letztere erlauben sogar eine bildgebende Spektroskopie.

Um verschiedene Substanzen mit einem einzigen System nachweisen zu können, werden durchstimmbare Laser benötigt. Bei ihnen kann die Wellenlänge über einen bestimmten Bereich variiert und nacheinander auf die gewünschte Absorptionsbande eingestellt werden.

Die passende Variante zur jeweiligen Anwendung

Das FBH verfolgt im Projekt zwei verschiedene Ansätze, die auf Master-Oszillator-Power-Amplifier (MOPA)-Konzepten basieren – jeder bietet seine eigenen Vorteile. Eine der beiden Varianten aus dem Forschungsbereich Photonik des FBH ist der Y-Laser mit integriertem Heizer, der auf einem Chip zwei eng beieinanderliegende Wellenlängen liefert. Dieser auf Oberflächengittern basierende Lasertyp lässt sich technologisch unkompliziert realisieren. Die zweite, wissenschaftlich-technologisch interessantere MOPA-Variante beruht auf speziellen integrierten Gittern zur Wellenlängenselektion, so genannten Abtastgittern oder „sampled gratings“. Durch die Entwicklung eines speziell darauf angepassten Prozesses gelang es erstmalig, derartige GaAs-basierte Bauelemente zu realisieren. Beide Varianten können über Bereiche bis zu 20 nm durchgestimmt werden – und eignen sich somit für die angestrebten Anwendungen. Die Emission der jeweiligen Laser wird dann in einer MOPA-Konfiguration in den Bereich mehrerer Watt verstärkt.

Ausgezeichnete Forschung im internationalen Doktorandenprogramm

In das Projekt *Mid-TECH* ist ein internationales Doktorandenprogramm integriert, an dem 15 Nachwuchswissenschaftler aus acht Ländern teilnehmen. So studierte Mahmoud Tawfiq Physik und Nanotechnologie an der Universität Dänemark (DTU). Am FBH konzentriert er sich darauf, Diodenlaser für derartige Spektroskopie-Anwendungen durchzustimmen. 23 Nanometer hat er bereits geschafft. „Wenn wir während der Messung die Wellenlänge des Diodenlasers modulieren, erhalten wir mehrere Bilder der gleichen Probe bei verschiedenen Infrarot-Wellenlängen. Diese Bildgebung gibt Ärzten zusätzliche Informationen über das Gewebe“, erklärt der FBH-Doktorand. Manche Moleküle absorbieren das Licht bei unterschiedlichen Wellenlängen verschieden stark, was wiederum Hinweise auf bestimmte

Zellvorgänge gibt. Tumorzellen, die schnell wachsen, verbrauchen beispielsweise mehr Sauerstoff als gesunde Zellen. Gesucht wird nach einem signifikanten Satz von Molekülsignaturen, die eine schnelle, eindeutige und örtlich sehr präzise Unterscheidung zwischen gesundem und Tumorgewebe ermöglichen.

Für seine Forschung wurde Mahmoud Tawfiq 2017 mehrfach ausgezeichnet, siehe auch S. 51. Bis die bildgebende mid-IR-Spektroskopie Pathologen einmal zur Verfügung steht, werden jedoch noch etliche Jahre vergehen, denn die Hürden für einen Einsatz in der Medizin liegen sehr hoch. In der Umweltanalytik aber – etwa bei der Analyse von Verbrennungsgasen in Motoren oder der Detektion von Gaslecks an Pipelines – könnte die Methode bereits in wenigen Jahren einsetzbar sein.

Mahmoud Tawfiq (left) receives the OSA/SPIE Student Paper Award 2017 – here with Prof. Dr. Majid Ebrahim-Zadeh (ICFO, Barcelona), one of the *Mid-TECH* project partners.

Mahmoud Tawfiq (l.) erhält den OSA/SPIE Student Paper Award 2017 – hier mit Prof. Dr. Majid Ebrahim-Zadeh (ICFO, Barcelona), Partner im *Mid-TECH*-Projekt.

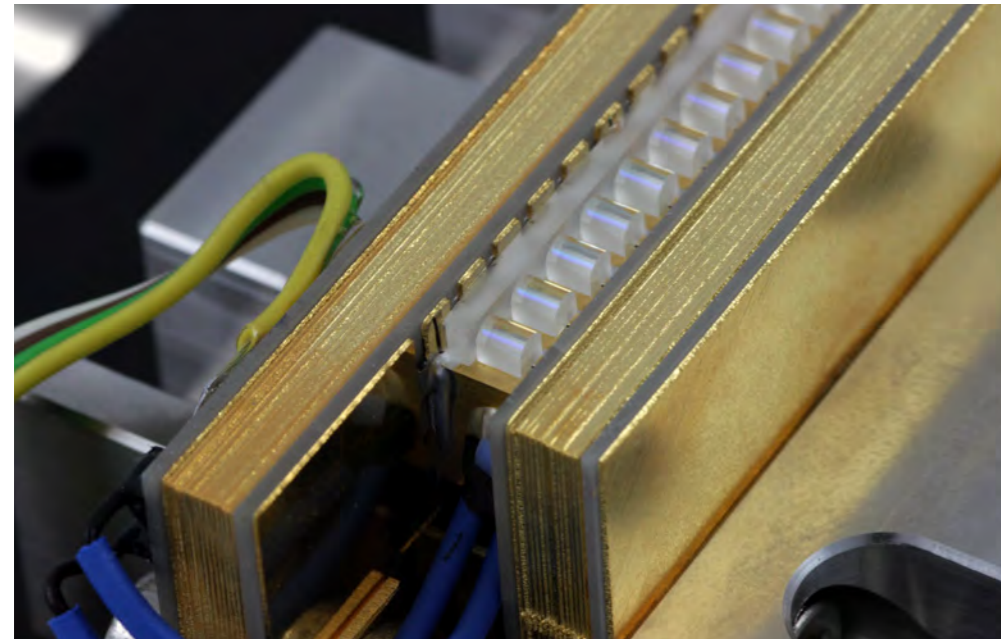


In strong demand – kilowatt-class diode laser bars

The efficient diode laser bars from FBH, which deliver optical power in the kilowatt class, are still in strong demand in industry – from materials processing to medicine. They play a key role both as pump sources for solid-state laser systems and in direct application. FBH develops optimized beam sources in its High-Power Diode Lasers Lab. Output power, efficiency, beam quality, narrow spectral linewidth, and high reliability are the focal points of research in this area. In close cooperation with industrial partners, designs and technologies were developed in 2017 to enable a new generation of kilowatt (kW) class diode laser bars for high-energy systems. These allow efficient operation at peak powers of 2 kW and higher than 60 % efficiency at 1 kW power, with pump wavelengths available in the range from 880 nm to 980 nm.

Pump diode designs have been optimized for future pulsed laser systems such as disk lasers for materials processing. This reduces rollover effects and loss mechanisms at high temperatures. Bars in the kilowatt class were demonstrated for disk lasers of up to > 1 kW output power in continuous wave operation at an efficiency greater than 60 %.

Significant improvements have also been made in those pulsed laser bars operating at highest possible pulse energy, which are used in basic research. They are required in laser research projects such as the Extreme Light Infrastructure (ELI). Here, the most intense lasers in the world will be used to investigate processes at high temporal resolution. Such applications require especially long pump pulses and high repetition rates. FBH, for example, has successfully demonstrated joule class bars that deliver > 1 J in a 2-millisecond-long pulse at an efficiency greater than 60 %. Such a passively cooled laser bar will be used as a pump source for future systems based on ytterbium-doped calcium fluoride crystals.



➤ High-power diode laser stack with lenses used as pump laser for short-pulse laser systems. Hochleistungs-Diodenlaserstack mit Linsen als Pumplaser für KurzpulsLasersysteme.

Stark nachgefragt – Diodenlaser-Barren für den Kilowatt-Bereich

Die effizienten Diodenlaserbarren aus dem FBH, die optische Leistungen im Kilowatt-Bereich liefern, sind bei der Industrie weiter heiß begehrt – von der Materialbearbeitung bis zur Medizin. Sowohl als Pumpquellen für Festkörperlaser-Systeme, als auch in der direkten Anwendung spielen sie eine Schlüsselrolle. In seinem High-Power Diode Lasers Lab entwickelt das FBH entsprechend optimierte Strahlquellen. Leistung, Effizienz, Strahlqualität, schmale spektrale Linienbreite und hohe Zuverlässigkeit sind die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten



➤ Custom fiber-coupled pump module for advanced high-energy-class solid-state lasers. Kundenspezifisches fasergekoppeltes Pumpmodul für moderne Hochenergieklasse-Festkörpersysteme.

in diesem Bereich. In enger Kooperation mit industriellen Partnern wurden 2017 unter anderem Designs und Technologien so weiterentwickelt, dass sie eine neue Generation von Diodenlaser-Barren der Kilowatt-Klasse (kW) für Hochenergie-Systeme ermöglichen. Sie erlauben den effizienten Betrieb mit Spitzenleistungen von 2 kW und mehr als 60 % Effizienz bei 1 kW Leistung bei verschiedenen verfügbaren Pumpwellenlängen im Bereich von 880 nm bis 980 nm.

Für künftige gepulste Lasersysteme, wie Scheibenlaser zur Materialbearbeitung, wurde das Design von Pumpdioden optimiert. Dies sorgt bei hohen Temperaturen für geringere Überroll-Effekte und Verlustmechanismen. Damit wurden Kilowatt-Klasse-Barren für Scheibenlaser bis > 1 kW Leistung im Dauerstrichbetrieb mit einer Effizienz von mehr als 60 % demonstriert.

Auch bei gepulsten Laserbarren mit größtmöglicher Pulsenergie, die in der Grundlagenforschung benötigt werden, wurden deutliche Verbesserungen erzielt. Sie werden unter anderem für Laserforschungsprojekte wie die Extreme Light Infrastructure (ELI) benötigt. Hierbei sollen die intensivsten Laser weltweit zum Einsatz kommen, um Prozesse mit hoher Zeitauflösung zu untersuchen. Für derartige Anwendungen werden besonders lange

Pumpimpulse und hohe Wiederholungsraten benötigt. Das FBH hat beispielsweise Joule-Klasse-Barren erfolgreich demonstriert, die > 1 J aus einem 2 Millisekunden langen Puls mit einer Effizienz von mehr als 60 % liefern. Es handelt sich dabei um einen passiv gekühlten Laserbarren, der als Pumpquelle für zukünftige Systeme benötigt wird, die auf Ytterbium-dotierten Kalziumfluorid-Kristallen basieren.

Small and versatile – high-power pulsed laser sources for lidar systems

Lasers that generate short optical pulses in the range of 200 ps to 20 ns are key components for a variety of applications. One such application is lidar (light detection and ranging), which is used for autonomous driving, 3D object recognition, and laser scanning (air- or satellite-based or terrestrial). The components used for this need to be as small as possible and consume very little energy. Without cooling, they must operate over a wide temperature range – between - 40 °C and 85 °C. Furthermore, they must be producible in large quantities at low cost.

FBH develops the required pulsed light sources featuring good beam quality and high peak power. Power outputs from 30 to 100 W are important for long ranges and high signal-to-noise ratio. Beam quality and pulse duration, in turn, determine the spatial resolution of the lidar. In view of this high pulse power, the pulses must only last a few nanoseconds in order to ensure eye safety. These laser sources combine two core competencies of the Institute: a tailored diode laser design and a laser driver based on GaN transistors. This allows current pulses to be generated at up to 250 A with controllable pulse amplitude and width.

Pulsed laser diodes for lidar applications are being developed in the joint project *PLuS*, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). DBR lasers with contact strips only 50 μm wide and operating over a spectral range of 35 nm have now been built for the first time at FBH. This corresponds to a temperature range of more than 100 K. Between 15 °C and 85 °C, they have emitted powers of around 30 W at the wavelength defined by the integrated Bragg grating.

Using an array of three single emitters, even more than 100 W can be achieved at temperatures up to 85 °C. Thanks to the good beam quality, the light of the three emitters can be bundled into a round beam spot using lenses. This allows objects to be scanned at a greater distance with good resolution. Such light sources are the basis for new, particularly powerful lidar applications. A special development for the automotive sector is described on p. 76.

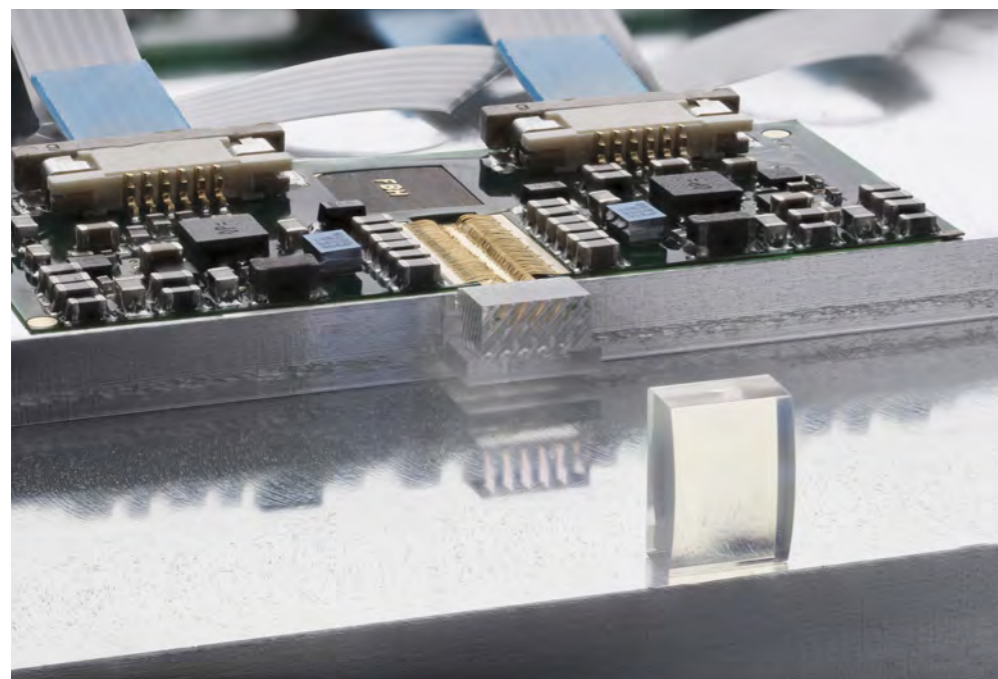
Klein und vielfältig einsetzbar – gepulste Hochleistungslaserquellen für LiDAR-Systeme

Laser, die kurze optische Pulse im Bereich zwischen 200 ps und 20 ns erzeugen, sind zentrale Komponenten für eine Vielzahl von Anwendungen. Dazu zählt auch LiDAR (Light Detection and Ranging), das für das autonome Fahren, 3D-Objekterkennung oder Laserscannen (luft- bzw. satellitengestützt oder terrestrisch). Die dafür verwendeten Komponenten müssen möglichst klein sein und dürfen nur sehr wenig Energie verbrauchen. Ohne Kühlung sollen sie über einen großen Temperaturbereich – zwischen -40°C und 85°C – einsetzbar sein. Zusätzlich müssen sie sich in großen Stückzahlen kostengünstig produzieren lassen.

Das FBH entwickelt die dafür nötigen gepulsten Lichtquellen mit guter Strahlqualität und hoher Spitzenleistung. Leistungen von 30 bis 100 W sind wichtig für große Reichweiten und ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis. Strahlqualität und Pulsdauer wiederum entscheiden über die räumliche Auflösung des LiDAR. Zwecks Augensicherheit dürfen die Pulse angesichts der hohen Pulsleistungen nur wenige Nanosekunden lang sein. Die Laserquellen vereinen zwei Kernkompetenzen des Instituts: ein maßgeschneidertes Diodenlaser-Design mit einer Laseransteuerung, die auf GaN-Transistoren basiert. Damit lassen sich Stromimpulse bis zu 250 A mit steuerbarer Pulsamplitude und -breite erzeugen.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt *PLuS* werden gepulst betriebene Laserdioden für LiDAR-Anwendungen entwickelt. Am FBH wurden nun erstmals DBR-Laser mit nur $50\ \mu\text{m}$ breiten Kontaktstreifen realisiert, die über einen spektralen Bereich von 35 nm arbeiten. Das entspricht einem Temperaturbereich von mehr als 100 K. Zwischen 15°C und 85°C emittierten sie Leistungen um 30 W bei der durch das integrierte Bragg-Gitter vorgegebenen Wellenlänge.

Mit einem Array aus drei Einzelemittlern können sogar mehr als 100 W auch bei Temperaturen bis zu 85°C erzielt werden. Dank der guten Strahlqualität lässt sich das Licht der drei Emittler mittels Optiken zu einem runden Strahlfleck bündeln. Damit können Objekte in größerer Entfernung mit guter Auflösung abgescannt werden. Derartige Lichtquellen sind die Basis für neuartige, besonders leistungsfähige LiDAR-Anwendungen. Eine spezielle Entwicklung für den Automotive-Bereich ist auf S. 76 zu finden.



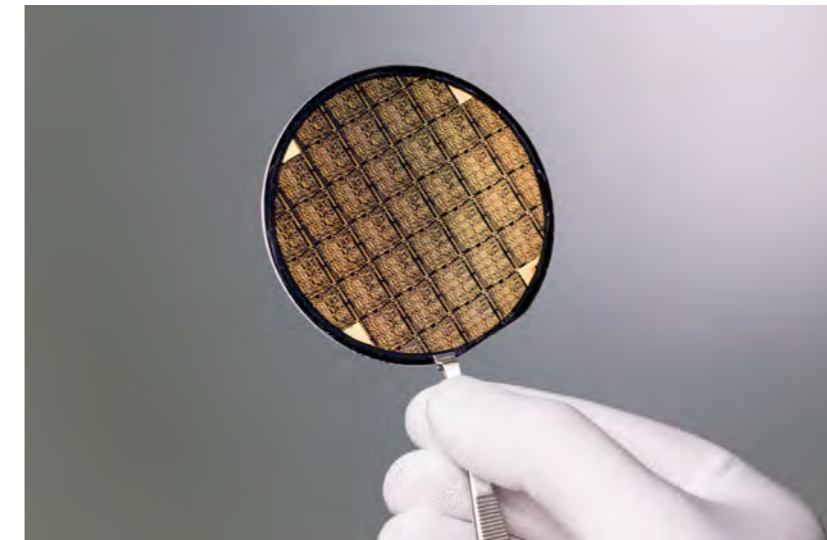
Very small high-power pulsed light source for lidar applications – here a special assembly with lenses.

Sehr kleine Hochleistungs-Puls-Lichtquelle für LiDAR-Anwendungen – hier ein spezieller Aufbau mit Linsen.

Faster, higher, and increasingly sophisticated – FBH developments for high frequencies

FBH has established itself as a go-to R&D supplier with its developments for high output-power broadband and terahertz (THz) electronic components. These are targeted to applications such as high-resolution radar, broadband wireless communications, and sensor technology. The components and integrated circuits developed at the Institute achieve characteristic values beyond the current state of the art. They are based on the in-house InP-DHBT technology for signal generation and amplification as well as FBH's GaN-HEMT technology for THz detectors. The institute has the entire value chain at its disposal – including circuit design, wafer processing, chip assembly, and characterization.

Fully processed wafer with monolithic integrated circuits based on InP HBTs. Prozessierter Wafer mit monolithisch-integrierten InP-HBT-Schaltungen.



With its developments, FBH is driving the very field of research forward and at the same time supporting companies in their applications that require THz electronics. The institute thus closes the gap between ongoing basic research and the application-oriented demand for a mature and stable technology with a reliable support chain including small and large signal characterization up to 500 GHz and spectroscopic measurement technology up to 2500 GHz.

The unique InP-based DHBT-MMIC process developed at FBH is characterized by high breakdown voltages and high cut-off frequencies. It is currently the fastest InP-DHBT-MMIC process in Europe and the only one in the world that can use different substrates. Among other things, it enables silicon-based BiCMOS circuits to be linked with those of the InP-DHBT process. This combines the advantages of two technologies: complex SiGe-BiCMOS circuits deliver high output power at high frequencies by means of downstream front-end circuits made with InP-DHBT. The current cut-off frequency is around 530 GHz with a simultaneous breakdown voltage of $> 4\ \text{V}$. An improved technology up to 1000 GHz with a breakdown voltage of $> 3\ \text{V}$ is already under development.

InP-DHBT technology has already demonstrated circuits with excellent broadband behavior of over 100 GHz, and even fundamental oscillators at 400 GHz operating frequencies. FBH has full chipsets for wireless communications and imaging MIMO radar for the W-band, which the Institute also develops for D- and J-band at up to 300 GHz. The chipsets contain power amplifiers with $> 150\ \text{mW}$ output power, frequency converters and modulators/demodulators with large bandwidths of up to 300 GHz, transimpedance and broadband amplifiers with over 100 GHz bandwidth, and low-noise amplifiers. Using FBH's flip-chip technology, these can be built into compact modules at frequencies of up to 500 GHz.

For higher frequencies, based on its proprietary GaN-MMIC process, FBH has developed unique THz detectors which have been directly integrated with broadband antennas. These achieve world record values in terms of sensitivity and noise-equivalent power, as several external users have already confirmed. Bandwidth ranges from 0.5 to 4 THz make these detectors promising for THz cameras and THz spectroscopy, as used for examining gases, liquids, and solids for example.

Schneller, höher und immer ausgefeilter – FBH-Entwicklungen für hohe Frequenzen

Das FBH hat sich mit seinen Entwicklungen für Breitband- und Terahertz (THz)-Elektronikkomponenten mit hohen Ausgangsleistungen als F&E-Lieferant etabliert. Diese zielen auf Anwendungen wie hochauflösendes Radar, die breitbandige drahtlose Kommunikation und die Sensorik. Die dafür am Institut entwickelten Komponenten und integrierten Schaltungen erreichen Kennwerte über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Sie basieren auf der hauseigenen InP-DHBT-Technologie für die Signalerzeugung und Verstärkung sowie der FBH-GaN-HEMT-Technologie für THz-Detektoren. Das Institut kann dabei auf die komplette Wertschöpfungskette im eigenen Haus zurückgreifen – einschließlich Schaltungsdesign, Wafer-Prozessierung, Chip-Montage und Charakterisierung.

Mit seinen Entwicklungen treibt das FBH das Forschungsfeld selbst voran und unterstützt zugleich Unternehmen bei ihren Anwendungen, die THz-Elektronik benötigen. Damit schließt das Institut die Lücke zwischen der laufenden Grundlagenforschung und der anwendungsorientierten Nachfrage nach einer ausgereiften und stabilen Technologie mit einer zuverlässigen Support-Kette inklusive Klein- und Großsignal-Charakterisierung bis 500 GHz und spektroskopischer Messtechnik bis 2500 GHz.

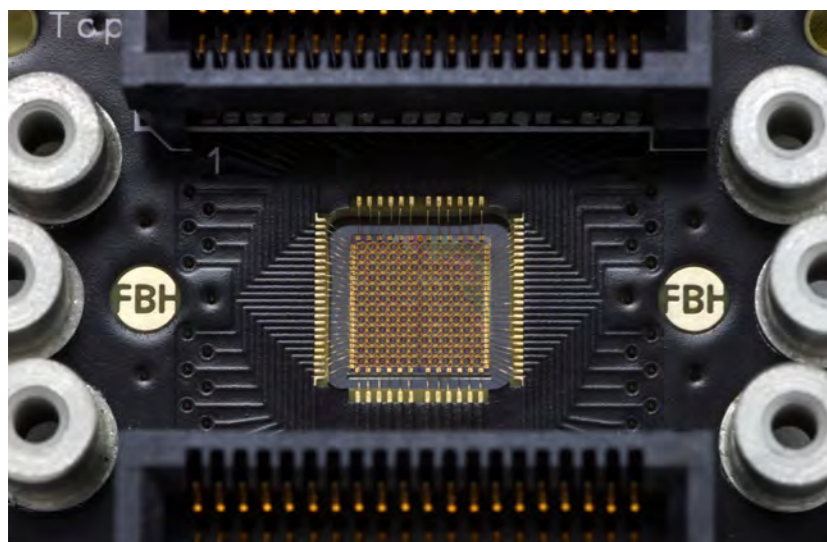
Der weltweit einzigartige am FBH entwickelte InP-basierte DHBT-MMIC-Prozess zeichnet sich durch hohe Durchbruchspannungen und hohe Grenzfrequenzen aus. Es ist derzeit der schnellste InP-DHBT-MMIC-Prozess in Europa und weltweit der einzige, der verschiedene Substrate verwenden kann. Unter anderem erlaubt er die Verknüpfung von siliziumbasierten BiCMOS-Schaltkreisen mit denen des InP-DHBT-Prozesses. Dadurch lassen sich die Vorteile zweier Technologien kombinieren: komplexe Schaltkreise in SiGe-BiCMOS liefern mittels nachgeschalteter Front-End-Schaltungen mit InP-DHBT hohe Ausgangsleistungen bei zugleich hohen Frequenzen. Die derzeitige Grenzfrequenz liegt bei etwa 530 GHz bei gleichzeitiger Durchbruchspannung von > 4 V. Eine verbesserte Technologie bis 1000 GHz mit einer Durchbruchspannung von > 3 V ist bereits in der Entwicklung.

Mit der InP-DHBT-Technologie wurden bereits Schaltungen demonstriert, die exzellentes breitbandiges Verhalten von über 100 GHz aufweisen, ebenso Fundamentalschwingern mit 400 GHz Betriebsfrequenzen. Das FBH verfügt über volle Chipsets für die drahtlose Kommunikation sowie bildgebendes MIMO-Radar für das W-Band; diese entwickelt es auch für das D- und J-Band bis 300 GHz. Die Chipsets enthalten sowohl Leistungsverstärker mit > 150 mW Ausgangsleistung, Frequenzumsetzer und Modulatoren/Demodulatoren mit großen Bandbreiten bis 300 GHz, Transimpedanz- und Breitband-Verstärker mit über 100 GHz Bandbreite sowie rauscharme Verstärker. Sie können mit der Flip-Chip-Technologie des FBH zu kompakten Modulen bei Frequenzen bis zu 500 GHz aufgebaut werden.

Für höhere Frequenzen hat das FBH einzigartige THz-Detektoren auf Basis des hauseigenen GaN-MMIC-Prozesses entwickelt, die direkt mit breitbandigen Antennen integriert wurden.

Sie erreichen internationale Spitzenwerte hinsichtlich Sensitivität und rauschäquivalenter Leistung, wie bereits mehrere externe Anwender bestätigten. Ihre Bandbreite umfasst 0,5 – 4 THz und macht die Detektoren für THz-Kameras und die THz-Spektroskopie interessant, die etwa für die Untersuchung von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern genutzt werden.

12x12 pixel focal plane array for terahertz cameras.
12x12 Pixel Focal Plane Array für Terahertz-Kameras.



Novel materials and transistor concepts

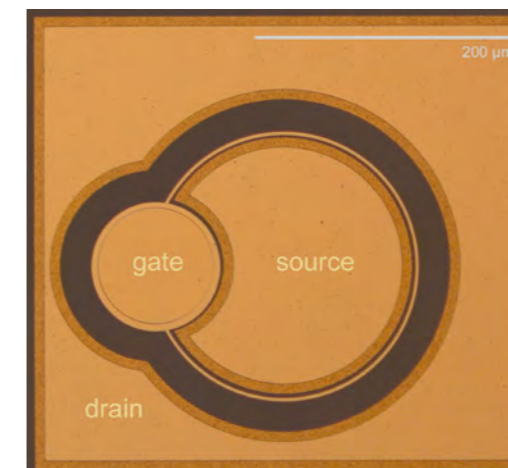
Gallium oxide transistors for power electronics

Whether used in high-voltage switches or touchscreens, metal oxides count among the materials with an especially wide range of physical properties. They are suitable for making new types of electronic power components with outstanding efficiencies. The Leibniz Science Campus GraFOx deals with the basic understanding of materials and the physical properties of suitable oxides. FBH has used the results to develop special gallium oxide field effect transistors. These were created on crystals and epitaxial layers from the Leibniz Institute for Crystal Growth, one of the GraFOx partners. By means of atomic layer deposition, FBH has created most technologically advanced components – and at the same time demonstrated the promising potential of this technology for applications in power electronics.

Different functionalities on one chip – strained GaN transistors

The electrical properties of GaN transistors depend, among other things, on the mechanical tension of the uppermost epitaxial layers above the actual transistor channel. These layers are usually only a few nanometers thick. Mechanical stresses introduced by the component process therefore have a direct influence on the transport properties of the electrons in the channel. A technological process was developed at FBH that can specifically influence and eliminate such stresses of the epitaxial layers under the gate electrode. This way, the threshold voltage of the transistors can be varied over a wide range. This new degree of freedom enables new monolithic integration concepts such as the joint integration of normally-off and normally-on transistors on a single chip. Low-noise transistors and microwave power transistors can also be implemented on an MMIC. This completely new concept is meeting with great interest worldwide and will be pursued further at FBH.

Neuartige Materialien und Transistorkonzepte



SEM viewgraph of a gallium oxide field-effect transistor.
SEM-Aufnahme eines Galliumoxid-Feldeffekttransistors.

Galliumoxid-Transistoren für die Leistungselektronik

Ob für Hochspannungsschalter oder Touchscreens, Metalloxide zählen zu den Materialien mit einer besonders großen Bandbreite an physikalischen Eigenschaften. Sie eignen sich für neuartige elektronische Leistungsbaulemente mit herausragenden Wirkungsgraden. Der Leibniz WissenschaftsCampus GraFOx beschäftigt sich mit dem grundlegenden Materialverständnis und den physikalischen Eigenschaften geeigneter Oxide. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse hat das FBH genutzt, um spezielle Galliumoxid-Feldeffekttransistoren zu entwickeln. Diese wurden auf Kristallen und epitaktischen Schichten des Leibniz-Instituts für Kristallzüchtung, einem der GraFOx-Partner, realisiert. Mittels Atomlagenabscheidung gelang es am FBH, Bauelemente auf dem neuesten technologischen Stand zu realisieren – und zugleich das vielversprechende Potenzial dieser Technologie für Anwendungen in der Leistungselektronik zu demonstrieren.

Verschiedene Funktionalitäten auf einem Chip – verspannte GaN-Transistoren

Die elektrischen Eigenschaften von GaN-Transistoren hängen unter anderem von der mechanischen Verspannung der obersten Epitaxieschichten über dem eigentlichen Transistorkanal ab. Diese Schichten sind in der Regel nur wenige Nanometer dick. Mechanische Verspannungen, die durch den Bauelementprozess eingebracht werden, wirken sich daher unmittelbar auf die Transporteigenschaften der Elektronen im Kanal aus. Am FBH wurde ein technologisches Verfahren entwickelt, das derartige Verspannungen der Epitaxieschichten unter der Gatelektrode gezielt beeinflussen und beseitigen kann. Auf diese Weise ist es möglich, die Schwellenspannung der Transistoren über einen weiten Bereich zu verändern. Dieser neue Freiheitsgrad ermöglicht neue monolithische Integrationskonzepte, wie die gemeinsame Integration von Normally-off- und Normally-on-Transistoren auf einem Chip. Auch

rauscharme Transistoren und Mikrowellen-Leistungstransistoren können auf einem MMIC realisiert werden. Dieses komplett neuartige Konzept stößt weltweit auf starkes Interesse und soll am FBH weiter verfolgt werden.

Microresonators – technologies for the next generation of devices

Many applications that exploit the properties of light require compact light sources with very special properties. These include precision measurement technology and quantum optical technologies for quantum optical sensors or bug-proof quantum communication.

For such applications, the importance of photonic integrated circuits is increasing. These are structures in which light can be targetedly guided, stored, or manipulated to interact with matter, for example with individual atoms or molecules. Key elements in such circuits are very low-loss waveguides. When these are self-contained, they can even store light resonantly, for which they are also known as microresonators. Because there is low attenuation, very high intensities are achieved. The nonlinear interaction between light and waveguide material can then be used for frequency conversion, for example to generate frequency combs.

Resonators used as optical filters have extremely small linewidths. Thus, they can be used to make very narrow-band laser sources that work on the principle of resonant optical feedback. Individual diamond defects can be coupled to waveguide structures to produce 'artificial atoms' that can be optically excited in an efficient way. This allows efficient 'collection' of the individual photons they emit.

As part of the *iMiLQ* project funded by the Investitionsbank Berlin, FBH develops photonic integrated components in which ring resonators and coupling waveguides are monolithically integrated on a single chip. These structures can be used, among other things, to downsize the width of the emitted laser radiation. At FBH, such a chip has reduced the linewidth from 1.4 MHz to 50 kHz by feeding resonant radiation back into a distributed-feedback diode laser. Technologically, the waveguide is made of silicon dioxide (SiO_2), which rests on a silicon substrate. To guide the light in the waveguide and to prevent it from radiating into the substrate, the SiO_2 waveguide is arranged on a thin cantilever generated by a selective etching process.

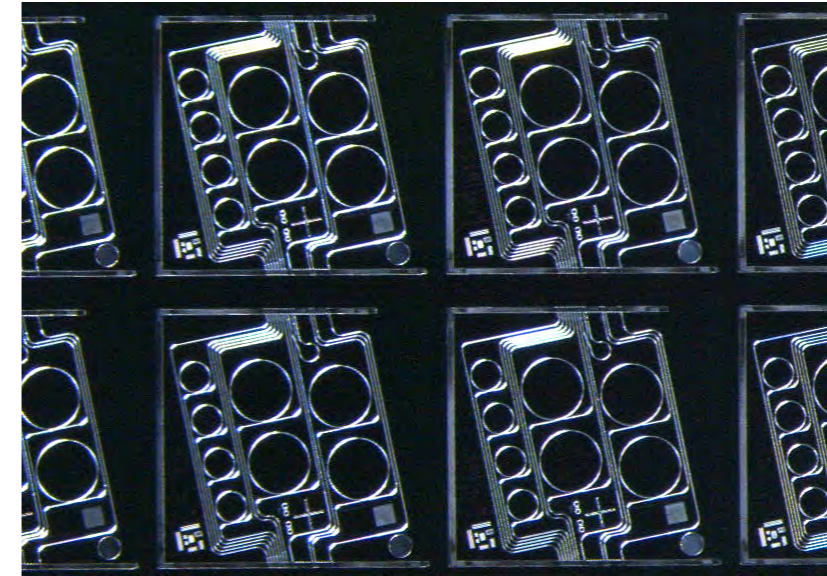
Mikroresonatoren – Technologien für die nächste Generation von Bauelementen

Viele Anwendungen, die die Eigenschaften von Licht nutzen, benötigen kompakte Lichtquellen mit sehr speziellen Eigenschaften. Dazu zählen die Präzisionsmesstechnik ebenso wie quantenoptische Technologien, etwa für quantenoptische Sensoren oder für die abhörsichere Quantenkommunikation.

In diesem Zusammenhang nimmt die Bedeutung von photonisch-integrierten Schaltungen zu. In derartigen Strukturen kann Licht gezielt geführt, gespeichert oder so manipuliert werden, dass es in Wechselwirkung mit Materie tritt, beispielsweise einzelnen Atomen oder Molekülen. Zentrales Element solcher Schaltungen sind sehr verlustarme Wellenleiter. Sind diese in sich geschlossen, können sie Licht sogar resonant speichern, man spricht dann von Mikroresonatoren. Wegen der geringen Dämpfung werden dabei sehr hohe Intensitäten erreicht. Die nichtlineare Wechselwirkung zwischen Licht und Wellenleitermaterial kann dann für die Frequenzkonversion genutzt werden, etwa um Frequenzkämme zu erzeugen.

Resonatoren, die als optische Filter eingesetzt werden, besitzen sehr geringe Linienbreiten. Daher ermöglichen sie sehr schmalbandige Laserquellen mittels resonanter optischer Rückkopplung. Indem einzelne Diamant-Defekte gezielt an Wellenleiterstrukturen gekoppelt werden, lassen sich diese „künstlichen Atome“ effizient optisch anregen. Auch das effiziente „Einsammeln“ einzelner, von ihnen emittierter Photonen ist so möglich.

Das FBH entwickelt im Rahmen des durch die Investitionsbank Berlin geförderten Projektes *iMiLQ* photonisch-integrierte Bauelemente, in denen Ringresonatoren und Koppelwellenleiter monolithisch auf einem Chip integriert werden. Mit derartigen Strukturen lässt



Dark-field photograph of microresonator systems for wavelength stabilization designed and manufactured at FBH. Dunkelfeldaufnahmen von Mikroresonator-Systemen zur Wellenlängenstabilisierung, die am FBH entwickelt und gefertigt wurden.

sich unter anderem die Breite der emittierten Laserstrahlung reduzieren. Am FBH ist es gelungen, mit einem solchen Chip durch Rückkopplung resonanter Strahlung in einen Distributed-Feedback-Diodenlaser, dessen Linienbreite von 1,4 MHz auf 50 kHz zu verringern. Technologisch ist der Wellenleiter in Siliziumdioxid (SiO_2) ausgeführt, das auf einem Silizium-Substrat aufliegt. Um das Licht im Wellenleiter zu führen und zu vermeiden, dass es in das Substrat abstrahlt, wird der SiO_2 -Wellenleiter auf einem dünnen Kragarm angeordnet, der durch einen selektiven Ätzprozess erzeugt wird.

More and increasingly diverse – training qualified junior staff

The Ferdinand-Braun-Institut has been actively training specialists in the high-tech sector for 25 years. In the academic field, thirteen scientists of the institute currently teach at six different universities and colleges nationwide. They supervise bachelor's, master's and doctoral theses – and are thus qualifying the next generation of scientists. FBH has even expanded its training capacities in the area of dual vocational training to remain well equipped for the future. After all, starting from 2020, highly qualified technical personnel will be needed to operate the new clean room currently being set up as part of the Research Fab Microelectronics Germany. As of 2017, FBH has therefore offered six training positions in the field of microtechnology instead of the previous three. FBH is currently training in three professions: Microtechnologist, Industrial Mechanic, and IT Specialist for Systems Integration.

Generally, it remains a broad social challenge to get suitable young people interested in a dual training. This is not easy in the field of microtechnology, especially, because the job profile is still relatively unknown, or the subject itself is considered too 'technical' or too 'demanding'. Accordingly, the number of applicants is quite meagre – despite comprehensive information campaigns and various activities at vocational training fairs, as well as close cooperation with the employment agency. In 2017, there were 42 applications, and the present training year attracted 36 applications.

Motivated trainees: early college leavers and refugees

For recruitment purposes, FBH uses the popular online training portals to make more people aware of the job profile and to advertise vacancies. At the same time, the institute is breaking new ground. For several years now, the colleagues in Education Management at FBH have been specifically approaching students who have abandoned their natural science studies in favor of doing work that is more practical. Depending on prior knowledge, they can even start at second-year level. The following applies to all: if their performance in school is good, the apprenticeship period can be shortened by six months. Experience also shows that many trainees want to continue gaining further qualifications as technicians or study afterwards. Among other things,

there is a formal acceptance procedure between the Lise-Meitner Vocational School and the University of Applied Sciences, in which microtechnology training content is recognized for the Bachelor of Microsystems Technology.



👉 **Microtechnology trainee Abdullah talks to those interested at the "job fair for refugees and migrants".**
 Mikrotechnologie-Azubi Abdullah informiert Interessierte auf der „Jobbörse für Geflüchtete und Migranten“.

Currently, there is a rising number of young people with a migrant background and refugees among applicants. In 2017, a total of seven trainees – one with Vietnamese roots and two young men from Iraq and Syria – started their training. A young woman from Afghanistan has since decided on a different education. Frank Brunner, a scientist from the FBH Materials Technology Department, is mentoring one of the new trainees, and gives a positive account of his experience to date. "My protégé is highly motivated, and things are also smooth on a personal level," he explains, and at the same time appeals to everyone's accepting nature: "It helps when you realize that these young people are learning a language from scratch and are making huge progress," Frank Brunner adds. "After all, the subject matter is demanding enough for many native speakers, so it is perfectly normal if a work assignment or an explanation is not immediately understood." In order to break down this language barrier as quickly as possible, the refugees take a German language course once a week alongside the vocational school, and are additionally supported by their mentors. Nicole Vlach from Education Management has only positive things to report: "At a fair for refugees, the two young men talked to people with such motivation. They proudly talked about their training and asserted that you can make it if you put in the effort. One can hardly imagine more ideal 'ambassadors' for the profession and for FBH."

Reorganized training

Twice the number of apprentices not only convinced FBH to continue advertising the profession, but also meant having to reorganize its microtechnology training internally. Tasks have had to be shared over more shoulders, training processes restructured, and teaching content adapted to ensure the quality of training does not suffer. Rather than one coordinator, there are now three colleagues who are responsible for coordinating training processes at FBH: Marlies Gielow for Materials Technology, Katrin Hilbrich for Mounting and Assembly and Kevin Kunkel for Process Technology. Furthermore, the colleagues from Education Management, Uta Voigt and Nicole Vlach, provide support in all matters of training and further education in the high-tech sector. Through the Education Network High Technology (ANH Berlin), they also offer this service to companies and research institutions in the region as part of the Photonics Cluster. Since 2004, FBH has also been exchanging information with other companies and research institutions through the Apprenticeship Association Microtechnology Berlin-Brandenburg in order to improve the overall quality of training.

Mehr und vielfältiger – qualifizierten Nachwuchs ausbilden

Das Ferdinand-Braun-Institut bildet seit 25 Jahren aktiv Fachkräfte für den Hochtechnologiebereich aus. Im akademischen Bereich lehren derzeit 13 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts an sechs verschiedenen Universitäten und Hochschulen bundesweit. Sie betreuen Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen – und qualifizieren so den wissenschaftlichen Nachwuchs. Im Bereich der dualen Ausbildung hat das FBH seine Ausbildungskapazitäten sogar ausgebaut, um weiter gut für die Zukunft gerüstet zu sein. Schließlich wird ab 2020 hoch qualifiziertes technisches Personal benötigt, um einen neuen Reinraum zu betreiben. Dieser wird zurzeit im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland aufgebaut. Daher bietet das FBH seit 2017 sechs statt bislang drei Ausbildungsplätze im Bereich der Mikrotechnologie an. Aktuell bildet das FBH in drei Berufen aus: Mikrotechnolog*in, Industriemechaniker*in und Fachinformatiker*in für Systemintegration.

Grundsätzlich bleibt es eine breite gesellschaftliche Herausforderung, geeignete Jugendliche für die duale Ausbildung zu begeistern. Gerade im Bereich der Mikrotechnologie ist das nicht einfach, da das Berufsbild nach wie vor zu wenig bekannt ist oder die Lehrinhalte als zu ‚technisch‘ oder zu ‚anspruchsvoll‘ eingeschätzt werden. Daher ist die Bewerberslage meist überschaubar – trotz umfassender Informationen und vielfältiger Aktivitäten auf Ausbildungsmessen sowie einer engen Kooperation mit der Arbeitsagentur. 2017 gab es 42 Bewerbungen, für das kommende Ausbildungsjahr sind es 36 Bewerbungen.



👉 **Training is fun – (almost) the entire team of microtechnology trainees at the FBH.**
 Die Ausbildung macht Spaß – das (fast) komplette Team der Mikrotechnologie-Azubis am FBH.

Motivierte Auszubildende: Studienabbrecher und Geflüchtete

Das FBH nutzt bei der Rekrutierung die gängigen Online-Ausbildungsportale, um das Berufsbild weiter bekannt zu machen und offene Stellen zu bewerben. Parallel beschreitet das Institut neue Wege. So gehen die Kolleginnen aus dem Bildungsmanagement des FBH seit einigen Jahren gezielt auf Studienabbrecher der naturwissenschaftlichen Fächer zu, die sich mehr praktische Betätigung wünschen. Abhängig von den jeweiligen Vorkenntnissen ist ein Einstieg in das 2. Lehrjahr möglich. Für alle gilt: Bei guten schulischen Leistungen kann die Lehrzeit um ein halbes Jahr verkürzt werden. Die Erfahrung zeigt auch, dass viele Auszubildende sich anschließend zum Techniker weiterqualifizieren oder studieren wollen. Unter anderem gibt es ein formelles Anerkennungsverfahren zwischen der Berufsschule Lise-Meitner und der Hochschule für Technik und Wirtschaft, bei dem Ausbildungsinhalte der Mikrotechnologie für den Bachelor in Mikrosystemtechnik anerkannt werden.

Unter den Bewerber*innen finden sich inzwischen auch vermehrt junge Menschen mit Migrationshintergrund sowie Geflüchtete. 2017 starten insgesamt sieben Auszubildende – darunter einer mit vietnamesischen Wurzeln, zwei junge Männer stammen aus dem Irak und aus Syrien. Eine junge Frau aus Afghanistan hat sich inzwischen für eine andere Ausbildung entschieden. Frank Brunner, Wissenschaftler aus der Materialtechnologie des FBH, betreut einen der Neu-Azubis als Mentor und bewertet die bisherigen Erfahrungen positiv. „Mein Schützling ist hoch motiviert, auch menschlich funktioniert es reibungslos“, erklärt er und wirbt zugleich um Verständnis bei den Kolleginnen und Kollegen. „Es hilft, wenn man sich bewusst macht, dass die jungen Leute eine Sprache vollkommen neu lernen und dabei riesige Fortschritte machen“, ergänzt Frank Brunner. „Der Lernstoff ist schließlich auch für viele Muttersprachler anspruchsvoll, daher ist es völlig normal, wenn ein Arbeitsauftrag oder eine Erklärung nicht sofort verstanden wird“. Um diese Sprachbarriere schnellstmöglich zu beseitigen gehen die Geflüchteten neben der Berufsschule einmal pro Woche zum Deutschkurs und werden von ihren Mentorinnen und Mentoren zusätzlich unterstützt. Auch Nicole Vlach aus dem Bildungsmanagement kann nur Positives berichten: „Auf einer Messe für Geflüchtete sind die beiden jungen Männer so motiviert auf Interessierte zugegangen. Sie haben stolz von ihrer Ausbildung berichtet und dafür geworben, dass man es schaffen kann, wenn man sich anstrengt. Idealere ‚Botschafter‘ für den Beruf und für das FBH kann man sich kaum vorstellen.“

Ausbildung neu organisieren

Doppelt so viele Azubis bedeutet für das FBH nicht nur die Werbetrommel für den Beruf weiter zu rühren, sondern auch die Mikrotechnologie-Ausbildung intern neu zu organisieren. Die Aufgaben müssen auf mehr Schultern verteilt, Ausbildungsabläufe neu strukturiert und Lehrinhalte angepasst werden, damit die Qualität der Ausbildung nicht leidet. Statt bisher einer Koordinatorin gibt es nun drei Kolleginnen und Kollegen, die sich um die Koordination der Ausbildungsabläufe am FBH kümmern: Marlies Gielow für die Materialtechnologie, Katrin Hilbrich für die Aufbau- und Verbindungstechnik und Kevin Kunkel für die Prozesstechnologie. Darüber hinaus unterstützen die Kolleginnen aus dem Bildungsmanagement, Uta Voigt und Nicole Vlach, bei allen Fragen rund um Aus- und Weiterbildung im Hochtechnologiebereich. Über das Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie (ANH Berlin) bieten sie diesen Service auch für Unternehmen und Forschungseinrichtungen in der Region im Rahmen des Clusters Optik & Photonik. Seit 2004 tauscht sich das FBH zudem über den Ausbildungsverbund Mikrotechnologie Berlin-Brandenburg mit anderen Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus, um die Qualität der Ausbildung insgesamt zu verbessern.



☛ Taking care of the trainees at FBH (from left to right): Kevin Kunkel, Katrin Hilbrich, Marlies Gielow. Sie kümmern sich um die Auszubildenden am FBH (v.l.n.r.): Kevin Kunkel, Katrin Hilbrich, Marlies Gielow.

Forschungsverbund Berlin – 25 years of top research

The Future on Stage – Top Research from Berlin: that was the motto under which the Forschungsverbund Berlin (FVB) celebrated its 25th anniversary in 2017. The research network comprises eight institutes – including FBH – that are conducting research in the international top league and making important social contributions in their fields.

On 18 May, at the venue of Urania, things kicked off with a ceremony followed by a symposium with lectures by the institutes and a LabSlam. In the foyer, the eight institutes that joined forces forming the FVB in 1992 presented themselves at information stands. In the large but packed Humboldt Hall, spokesman of the board Volker Haucke welcomed the high-ranking representatives from politics and science, employees of the institutes, and pupils. Originally intended as provisional, the alliance of eight research institutes of the former GDR Academy of Sciences has proven not only viable, but also extremely successful. “Reason enough to celebrate this year,” Haucke said.

On June 15, 2017, a large science party was held at the Kulturbrauerei for friends, sponsors, and employees of FVB. Governing Mayor Michael Müller gave words of welcome, which were followed by celebrating. Afterwards, Michael Müller twittered: “The Forschungsverbund Berlin has been rocking Berlin as a science and research location for 25 years and, tonight, the Kulturbrauerei.”



☛ The Forschungsverbund Berlin celebrates its 25th anniversary – here during the opening ceremony for the party at Kulturbrauerei. Der Forschungsverbund Berlin feiert sein 25-jähriges Bestehen – hier wird gerade die Party in der Kulturbrauerei eröffnet.

Forschungsverbund Berlin – 25 Jahre Spitzenforschung

The Future on Stage - Spitzenforschung aus Berlin – unter diesem Motto feierte der Forschungsverbund Berlin (FVB) 2017 sein 25-jähriges Jubiläum. Zum Forschungsverbund gehören acht Institute – darunter auch das FBH – die heute in der internationalen Top-Liga forschen und mit ihren Themen wichtige gesellschaftliche Beiträge leisten.

Los ging es am 18. Mai in der Urania mit einem Festakt, es folgte ein Symposium mit Vorträgen der Institute und ein LabSlam. Im Foyer präsentierten sich die acht Institute, die sich 1992 zum FVB zusammengeschlossen hatten, mit Info-Ständen. Im voll besetzten großen Humboldt-Saal begrüßte Vorstandssprecher Volker Haucke hochrangige Vertreter aus Politik und Wissenschaft, Institutsmitarbeiter, aber auch Schülerinnen und Schüler. Als Provisorium gedacht, habe sich der Zusammenschluss aus acht Forschungsinstituten der

ehemaligen DDR-Akademie der Wissenschaften nicht nur als lebensfähig, sondern als ausgesprochen erfolgreich erwiesen. „Grund genug, in diesem Jahr zu feiern“, sagte Haucke.

Am 15. Juni 2017 stieg dann eine große Wissenschafts-Party in der Kulturbrauerei für Freunde, Förderer und Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Forschungsverbundes. Der Regierende Bürgermeister Michael Müller hielt ein Grußwort, anschließend wurde gefeiert. Im Anschluss twitterte Michael Müller: „Der Forschungsverbund Berlin rockt seit 25 Jahren den Wissenschafts- und Forschungsstandort Berlin und heute Abend die Kulturbrauerei.“

Events – for experts and the general public

For experts

In 2017, FBH again presented its research results at the key industry and science meetings and made appearances at almost 20 international conferences.

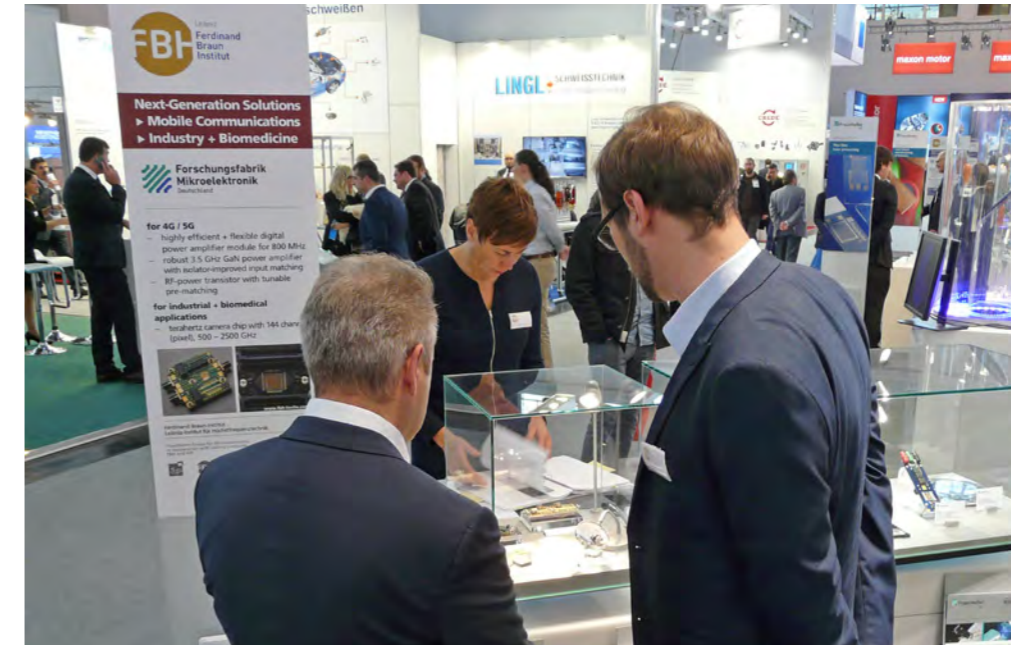
In the photonics research area, FBH demonstrated its international visibility in diode lasers and UV light-emitting diodes, most notably at Photonics West 2017 in San Francisco (USA). The number of papers from FBH once again increased slightly to 22 – including several invited lectures. With around 23,000 participants and more than 1,380 exhibitors, the trade fair and its associated technical conferences remains one of the most important photonics technologies events worldwide. FBH therefore made an appearance again the next year, for the first time with a booth at the German Pavilion. At the European level, FBH made itself highly visible with 14 contributions at the Laser World of Photonics and the affiliated CLEO Europe in Munich. The Institute again presented itself at the Berlin-Brandenburg joint booth. Regionally, FBH flew its colors at the Photonic Days Berlin Brandenburg, appearing both in the conference and at its own booth.



📍 **The FBH at Laser World of Photonics in Munich.**
Das FBH auf der Laser World of Photonics in München.

FBH also presented results from the research area III-V Electronics at the relevant specialist events. Among others, the institute presented twelve contributions at the European Microwave Week. Involved in the overall organization were Wolfgang Heinrich, President of the European Microwave Association, and Matthias Rudolph, Conference Software Officer. Other FBH scientists served as co-chairs for various sessions, and a workshop was co-organized by FBH. Furthermore, FBH had eleven presentations at the International Microwave Symposium and organized the workshop “Efficiency Enhancement and Linearization Techniques for Future Wireless Telecommunication Systems”. On top of this was an appearance at Productronica in the framework of the Research Fab Microelectronics Germany.

FBH also presented its results in the field of III-V Technologies at various conferences, including the International Conference on Nitride Semiconductors with one invited lecture and four other presentations. The Institute was represented at the Compound Semiconductor Week with eight presentations and its own booth. FBH made six contributions at the International Workshop on UV Materials and Devices.



📍 **The FBH presented itself within the framework of Research Fab Microelectronics at the Productronica trade fair in Munich.**
Das FBH präsentierte sich im Rahmen Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland auf der Productronica in München.

Adlershof Research Forum – future technologies for all

More than 150 participants attended the Research Forum in November 2017 as part of Berlin's Science Week. Among other things, FBH Director Günther Tränkle gave insights into the future technologies that are to be developed at FBH within the framework of the Research Fab Microelectronics Germany. More information on the goals and FBH's share in this innovative technology cooperation can be found on p. 13.

Summer School – for young academics

FBH made two contributions: “Micro-integrated semiconductor laser modules for experiments in space” and “Diode lasers & systems for spectroscopic applications”. The Summer School, organized by the OptecBB Competence Network, was held in 2017 at research institutions and companies in Berlin and Frankfurt (Oder). For five days, it offered a variety of insights into photonic integration, which plays an important role in high-performance telecommunications and sensor systems, among other applications. Photonic integration is allowing components to be built with ever-increasing functionality – along with higher speeds, smaller sizes, and lower energy consumption.

Girls' Day – more women in science!

FBH opened its laboratories again for Girls' Day in 2017. About twenty schoolgirls from 5th to 10th grade learned about careers in microtechnology, research, and development. Trainees and scientists took the students on guided tours through the institute, explained how a laser works, and demonstrated in many practical experiments what they work on every day.

Veranstaltungen – für Experten und ein breites Publikum

Für das Fachpublikum

2017 hat das FBH erneut seine Forschungsergebnisse auf den zentralen Branchentreffs vorgestellt und war insgesamt auf fast 20 internationalen Fachkonferenzen mit eigenen Beiträgen vertreten.

Im Forschungsbereich Photonik hat das FBH international seine Sichtbarkeit bei Diodenlasern und UV-Leuchtdioden insbesondere auf der Photonics West 2017 in San Francisco (USA) demonstriert. Die Anzahl der Fachbeiträge aus dem FBH ist mit 22 erneut leicht gestiegen – darunter mehrere eingeladene Vorträge. Mit etwa 23.000 Teilnehmenden und mehr als 1.380 Ausstellern bleibt die Messe mit den angeschlossenen technischen Konferenzen eines der wichtigsten Branchenevents weltweit. Daher war das FBH auch im Folgejahr erstmalig auf dem deutschen Pavillon mit einem Messestand vertreten. Auf europäischer

Ebene war das FBH auf der Laser World of Photonics und der angeschlossenen CLEO Europe in München mit 14 Beiträgen gut sichtbar. Das Institut präsentierte sich dort erneut auf dem Berlin-Brandenburger Gemeinschaftsstand. In der Region zeigte das FBH auf den Photonik-Tagen Berlin Brandenburg Flagge: Es war auf der Konferenz sowie auf der begleitenden Ausstellung mit einem eigenen Stand vertreten.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsbereich III/V-Elektronik stellte das FBH gleichfalls auf den relevanten Fachveranstaltungen vor. Unter anderem kamen 12 Beiträge auf der European Microwave Week aus dem Institut. Wolfgang Heinrich war als Präsident der European Microwave Association und Matthias Rudolph als Conference Software Officer in die Gesamtorganisation eingebunden. Weitere FBH-Wissenschaftler waren als Co-Chairs verschiedener Sessions aktiv, auch ein Workshop wurde vom FBH mitorganisiert. Darüber hinaus war das FBH auf dem International Microwave Symposium mit elf Beiträgen vertreten und hat den Workshop „Efficiency Enhancement and Linearization Techniques for Future Wireless Telecommunication Systems“ organisiert. Hinzu kam der Messeauftritt im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland auf der Productronica.

Auch im Bereich der III/V-Technologien präsentierte das FBH seine Ergebnisse auf verschiedenen Konferenzen, unter anderem auf der International Conference on Nitride Semiconductors mit einem eingeladenen und vier weiteren Vorträgen. Auf der Compound Semiconductor Week war das FBH mit acht Beiträgen vertreten und einem eigenen Stand. Auf dem International Workshop on UV Materials and Devices beteiligte sich das FBH mit sechs Beiträgen.

Adlershofer Forschungsforum – Zukunftstechnologien für alle

Mehr als 150 Teilnehmerinnen und Teilnehmer besuchten das Forschungsforum im November 2017. Die Veranstaltung war Teil der Berliner Science Week. Unter anderem gab FBH-Direktor Günther Tränkle Einblicke zu den Zukunftstechnologien, die im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland am FBH entstehen sollen. Mehr Informationen zu den Zielen und dem Anteil des FBH an dieser neuartigen Technologiekooperation gibt es auf S. 16.

Summer School – für den akademischen Nachwuchs

Das FBH beteiligte sich mit zwei Beiträgen: „Micro-integrated semiconductor laser modules for experiments in space“ und „Diode lasers & systems for spectroscopic applications“ an der Weiterbildung des akademischen Nachwuchses. Die vom Kompetenznetz OptecBB organisierte Summer School fand 2017 bei Forschungseinrichtungen und Unternehmen in Berlin und Frankfurt/Oder statt. Fünf Tage lang bot sie vielfältige Einblicke in die photonische Integration, die unter anderen bei Hochleistungs-Telekommunikationsanwendungen und Sensorsystemen eine wichtige Rolle spielt. Die photonische Integration sorgt für Bauelemente, die



Students visiting the FBH for the Summer School 2017.

Studierende, die das FBH zur Summer School 2017 besuchten.

immer mehr Funktionalitäten bieten – in Verbindung mit höheren Geschwindigkeiten, einer geringeren Größe und einem niedrigeren Energieverbrauch.

Girls' Day – mehr Frauen in die Wissenschaft!

Auch 2017 öffnete das FBH wieder seine Labore zum Girls' Day. Etwa zwanzig Schülerinnen der 5.-10. Klasse informierten sich über Berufe rund um Mikrotechnologie, Forschung und Entwicklung. Auszubildende, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler führten die Schülerinnen durch das Institut, erklärten wie ein Laser funktioniert und zeigten an vielen praktischen Experimenten, woran sie täglich arbeiten.

Personnel & Awards

Personalia & Auszeichnungen



Nils Weimann

Nils Weimann appointed to chair

In August, Nils Weimann, Head of the InP Devices & SciFab Lab at FBH, was appointed to the Chair of Components for High Frequency Electronics at the Faculty of Engineering at the University of Duisburg-Essen (UDE). His research at the Centre for Semiconductor Technology and Optoelectronics at UDE focuses on nanoscale components, including indium phosphide hetero-bipolar transistors for terahertz applications.

Nils Weimann auf Lehrstuhl berufen

Im August wurde Nils Weimann, Leiter des InP Devices & SciFab Lab am FBH, auf den Lehrstuhl für Bauelemente der Höchstfrequenzelektronik in der Fakultät Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen (UDE) berufen. Schwerpunkt seiner Forschung am Zentrum für Halbleitertechnik und Optoelektronik der UDE sind nanoskalige Bauelemente, unter anderem Indiumphosphid-Heterobipolartransistoren für Terahertz-Anwendungen.

Maria Reiner accepted into the Leibniz Mentoring Program

Maria Reiner was accepted into the Mentoring Program for Female Scholars at Leibniz Institutes. Leibniz Mentoring supports highly qualified female PhD researchers on their way to a managerial position or professorship.



Maria Reiner

Maria Reiner in Leibniz Mentoring-Programm aufgenommen

Maria Reiner wurde in das Mentoring-Programm der Leibniz-Gemeinschaft für Wissenschaftlerinnen aufgenommen. Das Leibniz-Mentoring unterstützt hochqualifizierte promovierte Forscherinnen auf ihrem Weg in eine Führungsposition oder Professur.

Doctoral student Mahmoud Tawfiq receives multiple awards

Mahmoud Tawfiq from the FBH Laser Sensors Lab received the OSA/SPIE Student Paper Award for his presentation at the ICO 24 conference. He also received the poster award of the Danish Optical Society for his research in the *Mid-TECH* project and received the Student Travel Award at the CLIRSPEC Summer School. Mahmoud Tawfiq won second prize for his presentation at the Falling Walls Lab Adlershof.

Doktorand Mahmoud Tawfiq mehrfach ausgezeichnet

Für die Präsentation auf der ICO 24 Konferenz erhielt Mahmoud Tawfiq vom Laser Sensors Lab des FBH den OSA/SPIE Student Paper Award. Er erhielt zudem für seine Forschungsarbeiten im Rahmen des *Mid-TECH*-Projekts den Posterpreis der Dänischen Optischen Gesellschaft und wurde auf der CLIRSPEC Summer School mit dem Student Travel Award ausgezeichnet. Beim Falling Walls Lab Adlershof gewann Mahmoud Tawfiq mit seiner Präsentation den zweiten Preis.

Physics Study Award for two PhD students from FBH

Two PhD students from FBH were awarded the Physik-Studienpreis (physics study award) of the German Physical Society in Berlin in 2017 for their master's degrees. Nils Werner's thesis "Development of Miniaturized Laser Sources in the Yellow-Green Spectral Range" was written in the Laser Modules Lab at the Ferdinand-Braun-Institut. Matthias Karow from the High-Power Diode Lasers Lab also received an award for his master's thesis, which he wrote at TU Berlin.

Physik-Studienpreis für zwei Doktoranden des FBH

Zwei Doktoranden des FBH wurden 2017 mit dem Physik-Studienpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zu Berlin für ihr Masterstudium ausgezeichnet. Nils Werners Arbeit „Development of Miniaturized Laser Sources in the Yellow-Green Spectral Range“ entstand im Laser Modules Lab am Ferdinand-Braun-Institut. Außerdem wurde Matthias Karow aus dem High-Power Diode Lasers Lab für seine Masterarbeit ausgezeichnet, die an der TU Berlin entstanden ist.

Outstanding theses

Jan Schlegel from the Process Technology Department received an award from the VDI Berlin-Brandenburg for his master's thesis "Production of Microresonators in Silicon Dioxide". Juliane Rama's master's thesis was awarded the Friedrich Wilhelm Gundlach Prize of the Association of Friends of Radio Frequency Technology. It was supervised by Wolfgang Heinrich, Head of the Microwave Department, and was written externally at the Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques.

Ausgezeichnete Abschlussarbeiten

Jan Schlegel aus dem Department Prozesstechnologie wurde für seine Masterarbeit „Herstellung von Mikroresonatoren in Siliziumdioxid“ vom VDI Berlin-Brandenburg ausgezeichnet. Die Masterarbeit von Juliane Rama wurde mit dem Friedrich-Wilhelm-Gundlach-Preis des Vereins der Freunde der Hochfrequenztechnik ausgezeichnet. Sie wurde von Wolfgang Heinrich, Leiter des Departments Mikrowellentechnik, betreut und entstand extern am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik.

FBH sporty

FBH sportlich

Employees of the Ferdinand-Braun-Institut continued their sporting activities in 2017. The team comprising Nicolas Hübener, Jonathan Decker, and Christoph Stölmacker crossed the finish line second in the Adlershof company relay.

The FBH running groups also performed excellently at the Berlin Company Run. For the second time for FBH, they won the internal Challenge Cup for the fastest team from the Forschungsverbund Berlin.



Auch 2017 waren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus dem Ferdinand-Braun-Institut wieder sportlich aktiv. So lief das Team mit Nicolas Hübener, Jonathan Decker und Christoph Stölmacker bei der Adlershofer Firmenstaffel auf Platz 2 ins Ziel.

Auch beim Berliner Firmenlauf schlugen sich die FBH-Laufgruppen hervorragend. Sie konnten den internen Wanderpokal für das schnellste Team aus dem Forschungsverbund Berlin nun schon zum zweiten Mal an das FBH holen.

🏆 2nd place in the Adlershof company relay (from left to right): Jonathan Decker, Nicolas Hübener, and Christoph Stölmacker.

2. Platz bei der Adlershofer Firmenstaffel (v.l.n.r.): Jonathan Decker, Nicolas Hübener und Christoph Stölmacker.

Science Management

Wissenschaftsmanagement

Science Management

FBH bundles a variety of services within its Science Management Department, aiming to support R&D activities at the institute and to relieve the strain on scientists. Services comprise prototyping, network and education management as well as administration and IT services. The offer is available to staff members and, in some cases, also to research partners.

Administration & IT Services

The institute's administration ensures smooth operational procedures and forms the interface to the joint administration of the Forschungsverbund Berlin. The unit is the first point of contact for finance, purchasing and sales, personnel, controlling as well as receiving and dispatching goods. Similarly, the IT group is integrated into the institute's Science Management Department, forming the interface to the Forschungsverbund's corporate IT.

Research Management & Transfer

Moreover, the department supports scientists in projects and R&D collaborations – up to international networks and collaborative research projects. The interdisciplinary team is also involved in large industrial and public funding projects. Its focus is on administrative and non-scientific work that is required when applying for complex collaborative projects and for the actual coordination, development and management of such projects and networks.

As in previous years, the Transfer group has placed its emphasis on the coordination of *Advanced UV for Life*. Meanwhile the consortium has grown to 50 partners, researching and developing UV LED technology along the entire value chain – from the crystal to the application in devices, used, e.g., for skin analysis. In 2017, 23 of the overall 41 projects approved in the meantime, were run in parallel – with the FBH being involved in a leading role in several of them. For these research activities, funds of up to 45 million Euros have been made available to the consortium until 2021.

Prototype Engineering Lab

FBH's Prototype Engineering Lab, newly created in 2014, has further consolidated its position at the institute. Core task of the four-person team is to construct prototypes in order to demonstrate applicability of the institute's research results in operational devices. Five new prototypes were built in 2017. Some of them have already been tested by industry partners and were presented at trade fairs like Laser World of Photonics in Munich – with consistently positive response.

Outreach, Training and Education

The department has long-term experience in education and training as well as in the provision of skilled workers in the high-tech sector. For more than 15 years, various projects have been managed by the institute, mainly aiming to recruit suitable junior staff and to sustainably secure skilled personnel for the scientific and technological area. ANH Berlin network (Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie), which was founded in 2007, has expanded its scope with the projects *HAI* and *beMINT*.

Wissenschaftsmanagement

Im Department Wissenschaftsmanagement bündelt das FBH vielfältige Dienstleistungen, die die F&E-Aktivitäten am Institut unterstützen und Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler entlasten. Diese Services reichen vom Prototypenbau, Netzwerk- und Bildungsmanagement bis hin zu Verwaltung und IT-Dienstleistungen. Sie stehen den Institutsmitarbeiterinnen und -mitarbeitern und teilweise auch Forschungspartnern zur Verfügung.

Verwaltung & IT-Services

Im administrativen Bereich sorgt die Institutsverwaltung für reibungslose Abläufe und ist die Schnittstelle zur Gemeinsamen Verwaltung des Forschungsverbundes Berlin. Die Institutsverwaltung ist erster Ansprechpartner rund um Finanzen, Ein- und Verkauf, Personal, Controlling sowie Warenannahme und -versand. Ähnlich ist auch die IT-Gruppe im Wissensmanagement des Instituts verankert, die die Schnittstelle zur Corporate IT des Forschungsverbundes bildet.

Forschungsmanagement & Transfer

Darüber hinaus unterstützt das Wissenschaftsmanagement die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei Projekten und F&E-Kooperationen – bis hin zu internationalen Netzwerken und Verbundforschungsvorhaben. Auch in größere Industrieprojekte und Fördervorhaben ist das interdisziplinär aufgestellte Team eingebunden. Es übernimmt administrative und nicht-wissenschaftliche Arbeiten, die bei der Beantragung komplexer Verbundvorhaben, der Koordination, Entwicklung und dem Management derartiger Projektverbünde anfallen.

Der Schwerpunkt der Gruppe Transfer lag wie in den Jahren zuvor auf der Koordination des Zwanzig20-Konsortiums *Advanced UV for Life*. Der auf mittlerweile 50 Partner angewachsene Verbund erforscht und entwickelt die UV-LED-Technologie entlang der kompletten Wertschöpfungskette – vom Kristall bis zur Anwendung in Geräten wie etwa zur Hautanalyse. 23 Projekte von zwischenzeitlich 41 befürworteten Vorhaben liefen 2017 parallel – in einige dieser Vorhaben ist das FBH teils federführend eingebunden. Für diese Forschungsarbeiten stehen dem Konsortium bis 2021 insgesamt bis zu 45 Millionen Euro zur Verfügung.

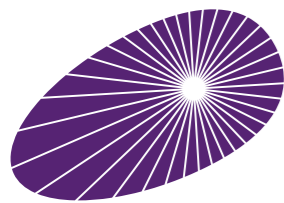
Applikationsentwicklung

Das 2014 neu geschaffene Entwicklungszentrum wurde am Institut weiter etabliert. Die Kernaufgabe des vierköpfigen Teams ist der Bau von Prototypen zur Demonstration der Forschungsergebnisse des FBH in einsatzfähigen Geräten. In 2017 wurden hierzu fünf neue Prototypen aufgebaut, die teilweise bereits von Industriepartnern getestet werden und auf Fachmessen wie der Laser World of Photonics in München vorgestellt wurden. Die Resonanz ist durchweg positiv.

Fachkräftesicherung

Langjährige Erfahrung besitzt die Abteilung bei der Aus- und Weiterbildung sowie der Fachkräftesicherung im Hochtechnologie-Sektor. Bereits seit über 15 Jahren laufen hierzu verschiedene Vorhaben unter der Leitung des Instituts. Insbesondere für den naturwissenschaftlich-technischen Bereich soll dabei geeigneter Nachwuchs geworben und Personal nachhaltig gesichert werden. Das 2007 gegründete Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologien Berlin Brandenburg konnte 2017 mit den Vorhaben *HAI Hightech-Ausbildung in Berlin-Brandenburg* und *beMINT* inhaltlich gestärkt werden.

Advanced UV for Life – the full value chain for UV LEDs



ADVANCED UV FOR LIFE

Since 2013, the FBH-managed *Advanced UV for Life* consortium is dedicated to development and application of UV LEDs, thereby closely interlinking science and business. Its partners work on application-oriented research issues and develop tailor-made UV LED technologies with high social relevance. As part of the program

"Twenty20 – Partnership for Innovation", the consortium is funded with up to € 45 million until the end of 2021 by the German Federal Ministry for Education and Research (BMBF).

The coordination office of *Advanced UV for Life* is located within FBH's Science Management Department. Its main focus is to initiate and maintain cooperation between the consortium partners. The office controls internal communication as well as prepares and organizes events for the consortium. Activities also include controlling functions and continuation of



the strategy. In 2017, a field of work initially designed for water treatment has been expanded and converted into the new field disinfection, while integrating the original working field water. This approach more effectively bundles the competencies of all the partners involved.

Another task is external communication, which is realized by organizing events that attract public attention and international conferences. In spring 2018, for example, the first-ever "International Conference on UV LED Technologies & Applications" (ICULTA-2018) will take place. Joint trade fair appearances are well accepted by the consortium partners. In 2017, the coordination office has organized participations at the LASER World of PHOTONICS in Munich and at the SPIE Photonics West exhibition in San Francisco (USA) at the beginning of 2018.

A particular challenge is the interface management between the meanwhile 43 R&D projects in order to fully profit from synergies within the alliance. Due to the large number of partners – currently 50 companies, universities, and research institutes – and topics of the consortium, it is important to bring together the right people and institutions. Moreover, the status of technology development and user requirements need to be regularly aligned.

For this purpose, the technical coordination has been further expanded, among others by the project "Cooperation, Communication and Public Relations of Advanced UV for Life", which started in July 2017.

Advanced UV for Life – die volle Wertschöpfungskette bei UV-LEDs

Seit 2013 widmet sich das vom FBH geleitete Konsortium *Advanced UV for Life* der Entwicklung und Anwendung von UV-LEDs. Dabei verzahnt es Wissenschaft und Wirtschaft eng miteinander. Die Partner bearbeiten anwendungsspezifische Forschungsfragen und entwickeln maßgeschneiderte UV-LED-Technologien mit hoher gesellschaftlicher Relevanz. Im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ wird das Konsortium mit bis zu 45 Millionen Euro bis Ende 2021 vom BMBF gefördert.

Die Koordinationsstelle von *Advanced UV for Life* ist im Department Wissenschaftsmanagement des FBH angesiedelt. Der Hauptfokus liegt darauf, die Zusammenarbeit zwischen den Konsortialpartnern zu initiieren und zu pflegen. Die Koordinationsstelle steuert die interne Kommunikation, bereitet Veranstaltungen des Konsortiums und seiner Leitungsgremien inhaltlich vor und organisiert diese. Außerdem übt sie Controlling-Funktionen aus und koordiniert die Fortschreibung der Strategie. So wurde ein anfangs nur für die Wasserbehandlung konzipiertes Arbeitsfeld im Jahr 2017 erweitert und in das neue Arbeitsfeld Desinfektion umgewandelt. Das ursprüngliche Arbeitsfeld Wasser wurde integriert. Damit werden die Kompetenzen der in diesem Bereich mitwirkenden Partner effektiv gebündelt.

Eine weitere Aufgabe besteht in der externen Kommunikation, die beispielsweise mit der Organisation von öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen bis hin zu internationalen Tagungen realisiert wird. So findet im Frühjahr 2018 erstmals die „International Conference on UV LED Technologies & Applications“ (ICULTA-2018) statt. Auch gemeinsame Messeauftritte werden von den Konsortialpartnern gerne genutzt. Die Koordinationsstelle organisierte 2017 einen Auftritt auf der LASER World of PHOTONICS in München und Anfang 2018 auf der SPIE Photonics West in San Francisco (USA).

Eine besondere Herausforderung ist das Schnittstellenmanagement zwischen den mittlerweile 43 F&E-Vorhaben, damit die im Konsortium möglichen Synergien voll zur Wirkung kommen. Aufgrund der Vielzahl der Partner – aktuell 50 Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen – und Themen des Konsortiums ist es wichtig, die richtigen

Personen und Einrichtungen zusammenzubringen. Auch der Status der Technologieentwicklung und die Anforderungen der Anwender müssen regelmäßig miteinander abgeglichen werden. Hierzu wurde die fachliche Koordination, unter anderem durch das im Juli 2017 gestartete Vorhaben „Zusammenarbeit, Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit von Advanced UV for Life“ weiter ausgebaut.

Prototype Engineering Lab – transferring FBH research results into applications

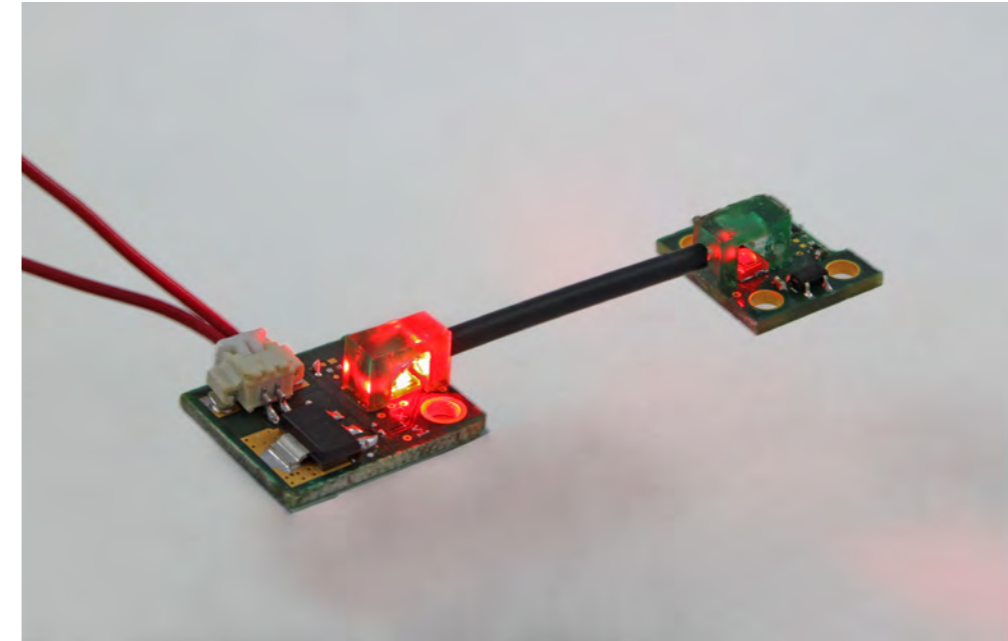
FBH's Prototype Engineering Lab is making the institute's technologies available for industrial usage. With its team of four engineers and technicians, FBH expands the scientific activities by systematic device engineering of user-friendly prototypes. Jointly with the lab and department heads, research results which are ready for transfer towards industrial application are identified regularly. The focus is placed on topics generating strong demand from industrial companies, which are usually seeking to test FBH modules in their specific application. Prototype engineering is also a good transfer method for research results which need extensive testing and further development before being ready for implementation into a final product. Often, business companies dare to expend this effort – this gap can be closed by FBH with its prototype engineering competencies.

Over the past years, the Prototype Engineering Lab has gained extensive experience in developing UVB irradiation modules used for plant growth lighting. Those compact devices are used in research projects at Leibniz Institute for Vegetable and Ornamental Crops (IGZ), exploring the formation of health-promoting plant components. In 2017, this series was supplemented with an assemblage adding red and blue LEDs to FBH's UVB LEDs. This new module allows a more flexible and comprehensive research on biosynthesis of active plant components since it allows exposure to light with a greater range of different wavelengths. The results obtained are promising so that IGZ has already started realizing large-scale irradiation in greenhouses with FBH's UVB LEDs.



LED module for plant growth lighting providing light of different wavelengths: UVB (310 nm), blue (451 nm), red (660 nm).
LED-Modul zur Pflanzenbestrahlung mit Licht verschiedener Wellenlängen: UV-B (310 nm), blau (451 nm), rot (660 nm).

However, the Prototype Engineering Lab is not only using its competencies to advance specific research results, but also supports their commercialization – with the goal to license the respective FBH technology. This is the next step for a potential-free probe head, which had been developed within a research project carried out with a small company for measurement equipment. The prototype team supplemented the research setup with an optical power supply to bias the active element, which is connected to the receiver by a dielectric waveguide. That way, the probe is galvanically isolated from the oscilloscope and allows to detect small differential voltages



Optical energy transmission for electronics of a potential-free probe head.
Optische Energieübertragung für die Elektronik eines potential-freien Tastkopfes.

which are superimposed by a high common mode voltage. This topic offers such great potential that the company is now starting with market-oriented product development. The emerging probe tip shall then be used for diagnostics in vehicle engine compartments as well as for characterization of highly efficient power amplifiers in mobile communications. FBH's intellectual property will be utilized under license.

Another FBH solution ready for industrial transfer is a device designed for pulsed measurement of transistor characteristic curves. To advance an existing lab setup, it was miniaturized and optimized for user-friendly operation, automatically providing output characteristics of GaN power transistors. The specific measuring method additionally allows the user to draw selective conclusions about thermal effects within the sample unit. This compact device will now be disseminated within the high-power transistors' community in order to strengthen FBH's research and business relationships in this field.

All activities of the Prototype Engineering Lab are funded by the German Federal Ministry for Education and Research (BMBF) within the *InnoMatch (Innovationswerkstatt Leibniz – matching supply and demand between science and industry)* project aiming to accelerate transfer of research results to small and medium-sized companies.

Entwicklungszentrum – überführt FBH-Forschungsergebnisse in Anwendungen

Das Entwicklungszentrum, ein 4-köpfiges Team aus Ingenieuren und Technikern am Ferdinand-Braun-Institut, macht die am FBH entwickelten Technologien für Industrieunternehmen nutzbar. Dies geschieht durch die systematische Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse zu praxismgerechten Demonstratoren und Prototypen.

Dazu werden gemeinsam mit den Labs und Departments Forschungsthemen ermittelt, die sich besonders gut für die Verwertung in der Industrie eignen. Das sind insbesondere Entwicklungen, die von Unternehmen oft nachgefragt werden – häufig verbunden mit dem Wunsch, diese in den jeweiligen Anwendungen mit einem FBH-Modul testen zu wollen. Interessant sind auch Forschungsergebnisse, bei denen vor dem konkreten Einsatz als Produkt noch weitere umfangreiche Tests und Weiterentwicklungen notwendig sind. Häufig scheuen Unternehmen den Aufwand – diese Lücke schließt das FBH mit den Leistungen seines Entwicklungszentrums.

Viel Erfahrung besitzt das Entwicklungszentrum inzwischen bei der Fertigung von UV-B-Bestrahlungsmodulen zur Pflanzenzucht. Die kompakten Geräte kommen seit mehreren Jahren in Forschungsprojekten am Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) bei der Biosynthese spezieller Pflanzenwirkstoffe zum Einsatz. Diese Reihe

wurde 2017 durch ein weiteres Gerät ergänzt, in das neben UV-B-LEDs vom FBH auch blaue und rote LEDs integriert wurden. Mit dem neuen Modul soll die Bildung gesundheitsfördernder Pflanzenstoffe bei der Bestrahlung mit Licht verschiedenster Wellenlängen künftig noch flexibler und umfassender untersucht werden können. Die Ergebnisse beim Forschungspartner sind so vielversprechend, dass das IGZ bereits die großflächige Bestrahlung von Pflanzen mit FBH-LEDs realisiert.

Das Entwicklungszentrum beschäftigt sich nicht nur mit der ingenieurtechnischen Aufbereitung ausgewählter Forschungsergebnisse, sondern unterstützt auch deren Vermarktung – mit dem Ziel, die zugehörige FBH-Technologie zu lizenzieren. Dieser Schritt steht nun mit einem am FBH entwickelten potentialfreien Tastkopf an. Die Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt wurden vom Team des Entwicklungszentrums mit einer optischen Stromversorgung komplettiert. Der Tastkopf ist galvanisch vom Oszilloskop getrennt und ermöglicht somit die Signalmessung von kleinen Spannungsdifferenzen, die mit einer hohen Gleichtaktspannung überlagert werden. Das Thema stieß bei einem KMU auf so großes Interesse, dass es nun mit der marktauglichen Produktentwicklung beginnt. Die entstehende Tastspitze kann zum Beispiel bei der Diagnose im Kfz-Motorraum oder zur Charakterisierung von hocheffizienten Leistungsverstärkern für die Mobilfunkkommunikation eingesetzt werden. Die FBH-Technologie wird dafür lizenziert.



Measurement system for characterization of GaN power transistors.
Messgerät zur Charakterisierung von GaN-Leistungstransistoren.

Auch eine FBH-Lösung zur gepulsten Messung von Transistorkennlinien bietet sich für die weitere Verwertung bei Industriepartnern an. Im ersten Schritt wurde dazu in 2017 ein bestehender Laboraufbau zu einem flexibel einsetzbaren, tragbaren Messgerät weiterentwickelt. Es liefert automatisiert die Ausgangskennlinien zur Charakterisierung von GaN-Leistungstransistoren. Das spezielle Messverfahren lässt zudem gezielte Rückschlüsse auf mögliche thermische Effekte innerhalb der Bauelemente zu. Dieses Gerät soll nun in der Community für Hochleistungstransistoren bekannt gemacht und verbreitet werden, um die Forschung und Unternehmensbeziehungen in diesem Bereich zu stärken.

Die Maßnahmen im Entwicklungszentrum werden im Vorhaben *InnoMatch* (Innovationswerkstatt Leibniz – Matching von Angebot und Nachfrage zwischen Wissenschaft und Wirtschaft) durch das BMBF gefördert. Ziel ist es, Forschungsergebnisse des FBH speziell für kleine und mittelständische Unternehmen aufzubereiten.

Outreach, education, and training in the Photonics Cluster

Ensuring a skilled workforce is a constant key issue for high-tech companies and institutes. All the more if there are plans to expand activities like for FBH, which is currently in the process of extending its clean room facilities. Thus, more qualified technicians will be needed in the future. The institute therefore decided to start training six apprentices in 2017 instead of three per year. However, finding enough suitable candidates is getting more and more difficult. Other companies and institutes in the Photonics Cluster are facing similar challenges. This has to do with the effects of demographic change but also with the fact that still many professions and training opportunities in the high technology sector are fairly unknown or even regarded as 'difficult' or 'unattractive'.

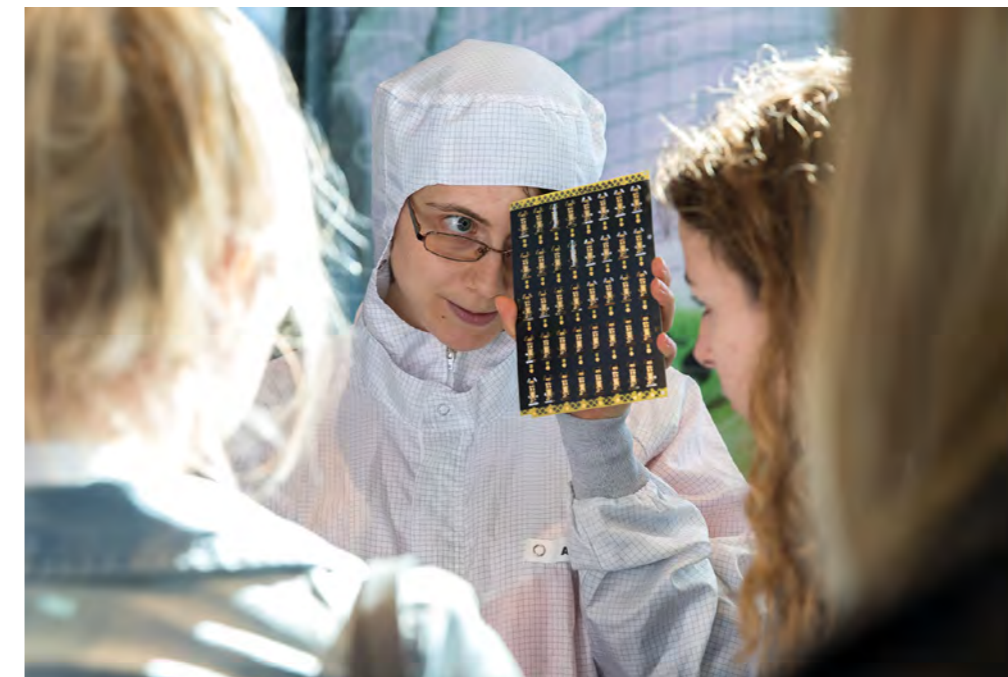
Getting young people into STEM

To change this, a small team within the Science Management Department coordinates a number of outreach activities within the ANH Berlin network (Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie) – not only on behalf of the institute itself, but also for the whole Photonics Cluster in the Berlin Brandenburg region. The main objective is to inform young people, school teachers, parents and other relevant multipliers about training opportunities and career prospects in natural science and technology. Thus, the ANH Berlin team is present at many education and training fairs as well as information days in schools.

In 2017, the new format "Ausbildungs-Allianz-Adlershof" was established by ANH Berlin in cooperation with other stakeholders from the Science and Technology Park and will be continued in 2018. The concept is supported by companies located in Adlershof that are opening their doors for school students to give them first-hand-information about real training and working conditions.

beMINT, a project funded by the Berlin industry, has a similar but more comprehensive approach. In close cooperation with the GenaU network of school laboratories and the vocational training center Lise Meitner School, FBH addresses several aspects having an influence on young peoples' decision-making about their future careers. The *beMINT* activities combine practical laboratory experiments in STEM (science, technology, engineering, mathematics) with visits in companies and institutes to give young people direct insight in everyday training and working conditions.

When it comes to choosing a profession, many boys and girls are seeking their parents' advice. Those, however, often only have reliable information concerning their own jobs and lack



A microtechnologist shows students the tiny structures on a printed circuit board during the "Ausbildungs-Allianz-Adlershof" event.
Eine Mikrotechnologin zeigt Schülerinnen im Rahmen der „Ausbildungs-Allianz-Adlershof“ die winzigen Strukturen auf einer Leiterplatte.

Berufsorientierung, Aus- und Weiterbildung im Cluster Optik und Photonik

Qualifizierte Arbeitskräfte sind gerade für Unternehmen und Institute im Hochtechnologiebereich unverzichtbar. Das gilt umso mehr, wenn F&E-Aktivitäten ausgebaut werden – wie etwa am FBH, das zurzeit seine technologische Infrastruktur um einen zusätzlichen Reinraum erweitert. Für dessen Betrieb benötigt das Institut künftig mehr qualifizierte Techniker und hat daher 2017 die Zahl der Auszubildenden von drei auf sechs erhöht. Jedoch wird es immer schwieriger, geeignete Bewerberinnen und Bewerber zu finden. Andere Unternehmen und Institute im Cluster Optik und Photonik stehen angesichts des demografischen Wandels vor ähnlichen Herausforderungen. Erschwerend kommt hinzu, dass noch immer viele Berufe und Ausbildungsmöglichkeiten im Hochtechnologiebereich ziemlich unbekannt sind oder sogar als ‚schwierig‘ oder ‚unattraktiv‘ gelten.

Nachwuchs für MINT begeistern

Um dies zu ändern koordiniert ein kleines Team innerhalb des Departments Wissenschaftsmanagement eine Reihe von Aktivitäten zur Nachwuchsgewinnung im Rahmen des Aus- und Weiterbildungsnetzwerks Hochtechnologie (ANH Berlin) – nicht nur für das Institut selbst, sondern für das gesamte Cluster in Berlin-Brandenburg. Insbesondere Jugendliche, Lehrkräfte, Eltern und andere relevante Multiplikatoren werden über Ausbildungsmöglichkeiten und Karriereaussichten in Naturwissenschaft und Technik informiert. Das ANH-Team ist daher auf vielen Aus- und Weiterbildungsmessen sowie Informationstagen in Schulen präsent.

2017 wurde erstmalig die „Ausbildungs-Allianz-Adlershof“ durchgeführt. Das Format wurde von ANH Berlin in Kooperation mit weiteren Akteuren des Wissenschafts- und Technologieparks organisiert und wird 2018 fortgeführt. Adlershofer Unternehmen öffnen dabei ihre Türen für Schülerinnen und Schüler, um sie aus erster Hand über reale Ausbildungs- und Arbeitsbedingungen zu informieren.

Einen ähnlichen, etwas umfassenderen Ansatz verfolgt *beMINT*, ein von der Berliner Industrie gefördertes Projekt. In enger Zusammenarbeit mit dem GenaU-Netzwerk der Schullabore und dem Oberstufenzentrumzentrum Lise Meitner beschäftigt sich das FBH mit den verschiedenen Aspekten, die die Entscheidungen junger Menschen hinsichtlich ihrer beruflichen Zukunft beeinflussen. Die *beMINT*-Aktivitäten kombinieren praktische Laborexperimente im MINT-Bereich (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) mit Besuchen in Unternehmen und Instituten. Auf diese Weise erhalten Jugendliche direkte Einblicke in alltägliche Ausbildungs- und Arbeitsbedingungen.

Bei der Berufswahl suchen viele Jungen und Mädchen den Rat ihrer Eltern. Verlässliche Informationen haben diese jedoch meist nur zu ihren eigenen Jobs und oft keine genauere Kenntnis über die Fülle an Arbeitsmöglichkeiten. Aus diesem Grund wenden sich immer mehr Aktivitäten zur Nachwuchsgewinnung auch an Eltern. Gemeinsam mit Partnern entwickelte und testete ANH Berlin das Format „Eltern auf Tour“. Diese Veranstaltung führte Eltern direkt an die Arbeitsplätze und informierte sie über Ausbildungsmöglichkeiten und Berufsbilder.

Einen allgemeineren Ansatz verfolgt *PHABLABS 4.0*, das im Rahmen des EU-Programms Horizont 2020 gefördert wird. Darin werden Workshops und Projekte entwickelt, in denen verschiedene Zielgruppen mehr über die Photonik als Schlüsseltechnologie und ihre verschiedenen Anwendungen erfahren. Die Teilnehmenden schaffen dabei ansprechende Komponenten, Systeme oder Kunstwerke, die auf den einzigartigen Eigenschaften von Licht basieren. Elf Top-Level-Photonics-Partner tragen diese Initiative, die sich auf 14 Pilot-Fab-Labs in zehn europäischen Ländern verteilt.

Berufliche Bildung

Berufliche Bildung hilft, hochqualifizierte Arbeitskräfte im Cluster Photonik und Optik zu sichern. Potenzielle Arbeitgeber sind daher eine zentrale Zielgruppe, für die ANH Berlin umfassende Aktivitäten entwickelt hat. Diese zielen insbesondere auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU). ANH Berlin hat daher seine Dienstleistungen mit dem Projekt



📍 “Tour for Parents” peeking into FBH’s clean room. „Eltern auf Tour“ beim Blick in den Reinraum des FBH.

detailed knowledge about the almost endless variety of job opportunities. That’s why more and more outreach activities address parents, too. Together with a number of partners, ANH Berlin developed and tested the new event “Tour for Parents”, opening FBH’s doors to provide them with first-hand information about training opportunities and job profiles.

A more general approach is pursued by *PHABLABS 4.0*, funded through EU’s horizon 2020 program. Workshops and challenger projects are being developed to give several target groups the chance to learn more about the enabling character of photonics and its various applications by creating some fascinating components, systems or pieces of art based on the unique properties of light. The initiative comprises 11 top-level photonics partners and 14 pilot fab labs spread over ten European countries.

Vocational education and training

To promote vocational education and training and thus ensure a well-qualified workforce within the Photonics Cluster, potential employers are a very important target group. Accordingly, FBH extended its services for small and medium-sized enterprises (SME) and research institutes in this field with the project *HAI* (high-tech training in Berlin-Brandenburg). Activities aim at raising the quality and attractiveness of vocational training in high technology and at supporting companies and institutes in major training matters.

In 2017, the ANH Berlin team advised 48 SMEs with their vocational trainings in the fields of electronics, microtechnology as well as precision mechanics and optics. Additionally, ANH Berlin performed two surveys in microtechnology vocational school classes and developed solution strategies to improve trainings in SME. One of the results was to encourage collaborative training ventures – the idea was subsequently realized by a ‘train the trainer program’ in microtechnology held at the Chip Academy Dresden. *HAI* is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF).



➡ At the photonics workshop in ViNN:Lab.
Beim Photonics Workshop im ViNN:Lab

HAI (Hightech-Ausbildung in Berlin-Brandenburg) entsprechend erweitert. Auf diese Weise sollen Qualität und Attraktivität der Berufsausbildung im Hochtechnologiebereich erhöht und Unternehmen in wichtigen Ausbildungsfragen unterstützt werden.

48 kleine und mittelständische Unternehmen hat das Team von ANH Berlin 2017 bei ihren Ausbildungen in den Bereichen Elektronik, Mikrotechnik sowie Feinmechanik und Optik beraten. Darüber hinaus wurden zwei Befragungen in Berufsschulklassen der Mikrotechnologie durchgeführt und daraus Lösungsstrategien für eine bessere Ausbildung in KMU entwickelt. Eine der Anregungen war, die Verbundausbildung zu fördern – diese Idee wurde später mit einem Train-the-Trainer-Programm in der Mikrotechnologie an der Chip Academy Dresden umgesetzt. *HAI* wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Photonics Photonik

Photonik

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, die vom infraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich emittieren, sowie Laserdioden und LEDs auf Galliumnitrid-Basis, die im UV-Spektralbereich abstrahlen. Aktuell setzt das FBH die folgenden Schwerpunkte:

- **Hochleistungs-Diodenlaser** – Breitstreifenlaser, Laserbarren und Stacks, optimiert auf hohe Ausgangsleistungen. Sie werden u.a. als Pumplaser und für die direkte Materialbearbeitung genutzt.
- **Lasermodule** – in die miniaturisierten Module 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.
- **Lasermetrologie** – in diesem Bereich werden ultra-schmalbandige Diodenlasermodule entwickelt. Dank der Hochpräzisionsmontage sind sie besonders kompakt und robust und eignen sich daher auch für Weltraumanwendungen.
- **GaN-Optoelektronik** – auf diesem Gebiet entwickelt das FBH Nitrid-Laserdioden und UV-Leuchtdioden, insbesondere für den UV-B- und UV-C-Spektralbereich. Die LEDs eignen sich u.a. für die Oberflächenbehandlung und die Pflanzenbeleuchtung.

Das erforderliche grundlegende Know-how hält das Department Optoelektronik bereit. Es entwirft, realisiert und charakterisiert die zugehörigen Diodenlaser-Chips.

Photonics

Within its photonics research area, FBH covers a broad range of diode laser and 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, emitting from the infrared to the UV spectral range, as well as laser diodes and LEDs based on gallium nitride with emission in the UV spectral range. The FBH currently focuses on the following topics:

- **High-power diode lasers** – broad area lasers, laser bars, and stacks optimized for high output powers. They are used as pump lasers as well as for direct materials processing.
- **Laser modules** – optics for beam shaping, external resonators, electronics, and crystals for frequency doubling are integrated into the miniaturized laser modules. Even subsequent coupling into glass fibers is possible. These light sources are ideally suited for applications including displays 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.
- **Laser metrology** – ultra-narrowband diode laser modules are developed in this field. Due to high-precision mounting they are particularly compact as well as robust and thus perfectly suited for space applications.
- **GaN optoelectronics** – FBH develops nitride laser diodes and UV light-emitting diodes (LED) especially for the UVB and UVC spectral range. Applications eligible for LEDs include surface treatment and plant illumination.

The required basic know-how for these developments is provided by the Optoelectronics Department. It designs, realizes, and characterizes the corresponding diode laser chips.

Progress in the simulation of broad-area lasers

Due to their high efficiency, easy handling and cost-effective production, high-power broad-area diode lasers are important pump sources for all kinds of laser systems. They can also be used for further applications including light detection and ranging (LiDAR) systems, needed for autonomous driving. When optimizing these devices, proper simulation tools are essential to reduce cost and time.

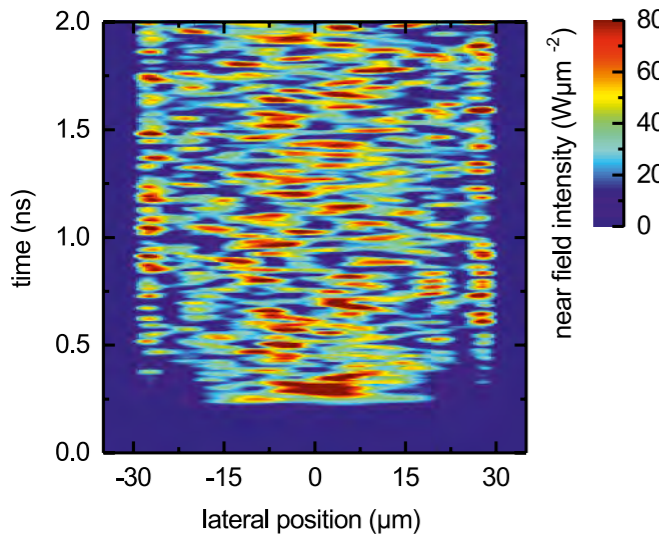


Fig. 1. Time evolution of the near-field intensity of a broad-area laser at the output facet for the first 2 ns at a very high injection current of 30 A.

As broad-area lasers exhibit strong field dynamics (see Fig. 1) even for continuous wave (CW) operation, a time-dependent model for the optical field has to be employed. Since this model results in long simulation times, a full 3-dimensional solution of the governing equations is not possible at today's standard, computational power and approximations must be made. FBH therefore employed a simulation tool developed together with the Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics. The software deals with this problem by reducing the computational domain to a 2(space) + 1(time) dimensional model, where the vertical growth direction of the laser only enters the model by effective parameters and is not considered rigorously.

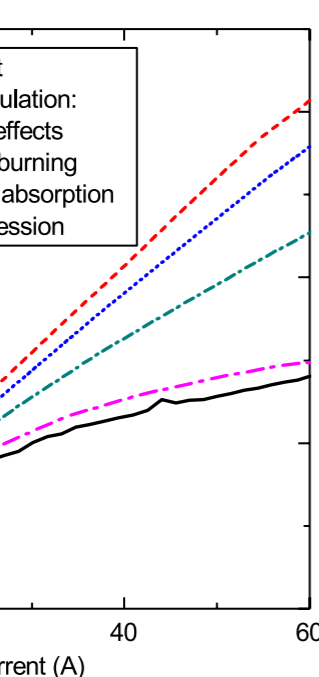


Fig. 2. Output power characteristics of a DBR laser comparing the simulation results (colored) with and without additional nonlinear effects to the measurement (solid black).

LiDAR applications demand for nanosecond-long optical pulses with very high peak powers, resulting in very high field intensities of more than $80 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ (Fig. 1). At such elevated field intensities, nonlinear effects have a high impact on the output power and need to be taken into account in the simulation. These effects include the process of spatial hole burning, where a 'hole' is burned into the spatial carrier density distribution as a result of stimulated recombination and a finite carrier lifetime. Accordingly, amplification is diminished and optical power is reduced. Another effect that is known to occur at very high field intensities is the process of two-photon absorption. Here, two photons are absorbed in the confinement or cladding layers so that the output power is additionally reduced.

Fig. 2 shows the simulated and the measured power-current characteristics of a distributed Bragg reflector (DBR) broad area laser with a $50 \mu\text{m}$ wide aperture and a 6 mm long cavity. Without additional nonlinear effects (red dashed), no saturation of the output power is visible up to 60 W . Spatial hole burning (dotted blue) and additional 2-photon absorption (dash-dotted green) cannot alone explain the saturation of the output power with increasing current. Thus, other effects must be present. Carrier accumulation in the confinement and cladding layers can be largely excluded because the epitaxial layer structure had been optimized with this respect. Further nonlinear effects are spectral hole burning and carrier heating, which can be phenomenologically described by a gain compression model. Indeed, the measured characteristics (solid black) can be well reproduced by appropriate adjustment (dash-dotted magenta).

Besides a high output power, a good beam quality is essential for many applications. However, the beam emitted by broad-area lasers becomes more and more divergent with increasing power, deteriorating the beam quality. The reasons for this so-called far-field blooming are thermal effects as a consequence of self-heating of the device as well as non-thermal effects. These occur due to lateral current spreading,

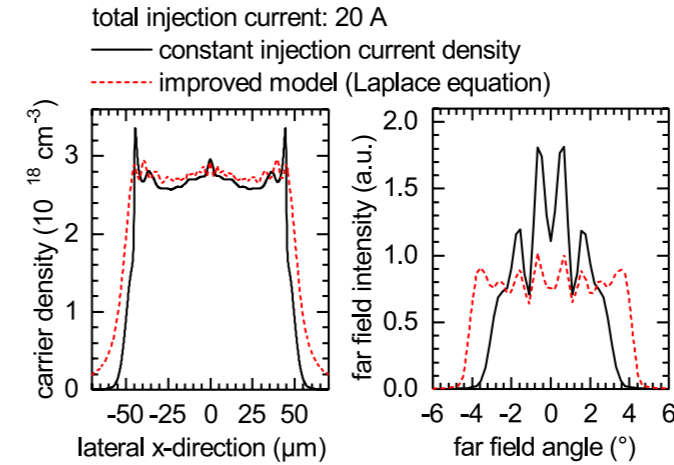


Fig. 3. Lateral carrier density distribution at the output facet (l.) and resulting far-field intensity (r.) for a constant injection current density (solid black) and the improved current density model (dashed red).

carrier diffusion and accumulation, and spatial hole burning, resulting in a modification of the optical gain and the refractive index profiles.

It turned out that for a correct description of non-thermal far-field blooming, a correct description of the profile of the injected current density is essential. Many simulation tools used for broad-area lasers assume a constant current density within the contact stripe and a vanishing current density outside. In a more accurate model, the current density is given by the gradient of the quasi-Fermi potential in the p-doped layers obtained by solving a two-dimensional Laplace equation.

In Fig. 3 the lateral carrier density profile (left) and the profile of the far-field intensity (right) of a 4 mm long Fabry-Pérot laser with a $90 \mu\text{m}$ wide contact stripe are compared for both models. The more accurate model (dashed red) leads to a stronger accumulation of carriers at the edges of the aperture and thus to a larger far-field divergence compared to the

previous model, where a constant current density had been assumed (solid black).

Further improvements of the simulation tool concerning device heating are planned in the future to obtain an even better description of the real behavior of high-power broad-area lasers for CW operation.

This work was supported by the German Federal Ministry of Education and Research contract 13N14005 and 13N14026 as part of the *EffiLAS/HotLas* and *EffiLAS/PLuS* projects.

Breitstreifen-Diodenlaser werden vielfältig eingesetzt, da sie eine hohe Effizienz bieten, einfach zu handhaben sind und kostengünstig produziert werden können. Die Simulation dieser Laser ist wichtig, um insbesondere Kosten und Zeitaufwand bei deren Entwicklung zu minimieren. Bei sehr hohen Ausgangsleistungen spielen nichtlineare Effekte eine Rolle, die zu einer Sättigung der Leistungs-Strom-Kennlinien führen und somit bei der Simulation berücksichtigt werden müssen. Die hohen Injektionsströme erfordern eine genaue Modellierung der Strominjektion, um das laterale Fernfeld von Breitstreifenlasern richtig zu beschreiben. Viele Simulationstools verwenden das Modell einer konstanten Injektionsstromdichte, die jedoch die Strahldivergenz beträchtlich unterschätzt. Das FBH hat gemeinsam mit dem Weierstrass-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik ein Simulationsprogramm entwickelt, mit dem zukünftig gepulst betriebene Breitstreifenlaser, z.B. für LiDAR-Anwendungen, genau beschrieben und optimiert werden können.

Publications

A. Zeghuzi, M. Radziunas, A. Klehr, H. J. Wünsche, H. Wenzel, A. Knigge, "Influence of non-linear effects on the characteristics of pulsed high-power broad-area distributed Bragg reflector lasers", *Opt. Quantum Electron.*, vol. 50, no. 88, pp. 1-12 (2018).

A. Zeghuzi, M. Radziunas, H. Wenzel, H. J. Wünsche, U. Bandelow, A. Knigge, "Modeling of current spreading in high-power broad-area lasers and its impact on the lateral far-field divergence", *Proc. SPIE*, vol. 10526, pp. 1052652-1-1052652-9 (2018).

M. Radziunas, A. Zeghuzi, J. Fuhrmann, T. Koprucki, H. J. Wünsche, H. Wenzel, U. Bandelow, "Efficient coupling of the inhomogeneous current spreading model to the dynamic electro-optical solver for broad-area edge-emitting semiconductor devices", *Opt. Quantum Electron.*, vol. 49, no. 10, pp. 1-8 (2017).

Theoretical investigations of a DFB laser frequency-stabilized by a high-finesse resonator

For many years, ultra-narrow linewidth diode lasers have been attracting growing interest of both the optoelectronic industry and the scientific community. Application fields include coherent optical free-space communication and high-precision metrology like optical frequency standards or light- and matter-wave interferometers. However, the optical frequency of the laser emission is always subject to small fluctuations due to spontaneous emission and other noise sources or parameter fluctuations. Several schemes have been developed to reduce

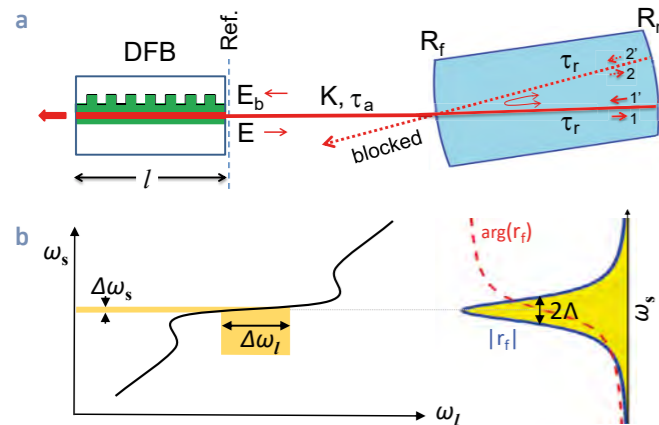


Fig. 1a). Main elements of the theoretical configuration. Ref.: reference plane. Blue box: tilted confocal Fabry-Pérot etalon. Red: light pathway split into two beams due to tilting. 1(2) and 1'(2'): labels of forward and backward traveling fields on these beams. b) Frequency stabilization close to a resonator resonance. Black line (l.): light frequency ω_s of coupled configuration vs. frequency ω_l of solitary DFB laser. Blue line with yellow filling (r.: same vertical axis): magnitude of reflectivity $|r_f|$ of resonator. Red dashed line: phase.

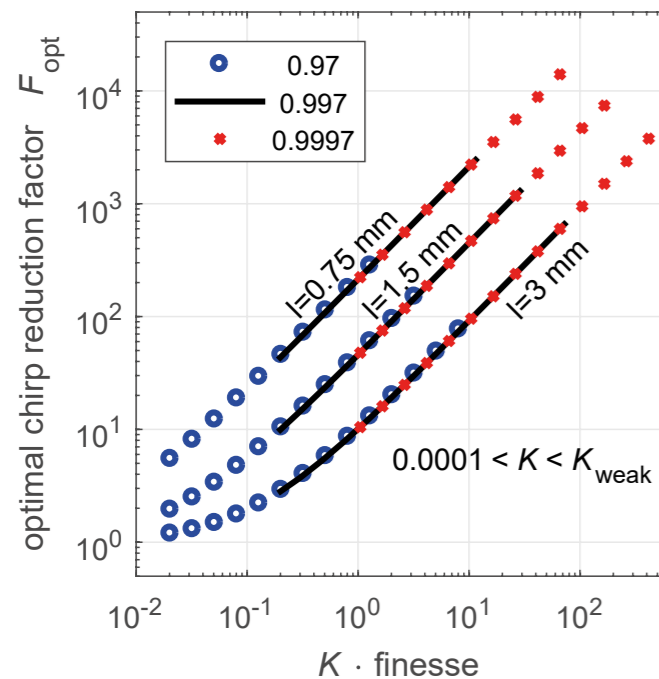


Fig. 2. Optimal chirp-reduction factor F_{opt} for different values of front reflectivity R_f (legend), DFB laser length l (labels), and for feedback strengths K varying from 10^{-3} up to the border K_{weak} of the domain of weak feedback (cf. Fig. 3).

frequency fluctuations, among them self-injection locking by resonant optical feedback. By combining this feedback scheme with the high spectral purity of a semiconductor distributed feedback (DFB) diode laser in a miniature resonant-feedback configuration, extremely low levels of frequency noise were experimentally demonstrated, thus opening new fields of application. However, a detailed theoretical investigation is needed to better understand the limits of linewidth reduction.

An exemplary configuration was investigated, sketched in Fig. 1a. The emission from one facet of the DFB laser is injected through some coupling optics (not drawn) into a confocal Fabry-Pérot etalon (FP). The FP is tilted, in which case the intensity returning to the laser reaches its maximum in the resonances and approaches zero outside. When tuning the solitary laser frequency ω_l through a resonance, the frequency ω_s of the emitted light deviates from ω_l due to the presence of feedback. Under certain conditions, ω_s stays extremely close to the resonance in a wide range of ω_l , as sketched in Fig. 1b. Accordingly, a small variation ω_l of the free-running frequency transforms into a much smaller variation ω_s of the frequency of the compound system. This reduction of the adiabatic chirp is usually quantified by the factor $F = \Delta\omega_l / \Delta\omega_s$. Interestingly, the same factor is also the crucial parameter for the reduction of low-frequency noise and spectral linewidth, as concordantly shown in the treatments of noise in semiconductor lasers. The amplitude $\Delta\omega_l$ of small slow frequency fluctuations of the solitary laser is reduced by the feedback to $\Delta\omega_l / F$ and so is also the $1/f$ contribution to the spectral linewidth. The flat part of the frequency noise spectrum (white noise) and the Lorentzian (or intrinsic) linewidth are even reduced by F^2 because they are quadratic in the Fourier-transformed phase fluctuations. Consequently, finding limitations of linewidth reduction does not need an explicit noise treatment but can be done based on the chirp-reduction factor F of the ideal noise-free configuration.

The chirp reduction factor depends sensitively on the exact value of round-trip time τ_a (or the round-trip phase or the distance between laser and resonator on a sub-wavelength scale). The optimum value F_{opt} gets much larger than unity, and it is proportional to both feedback strength and finesse. It is plotted versus the product of feedback strength K and finesse of the resonator for three exemplary cavity lengths l of the DFB laser in order to illustrate the dependence on laser and feedback parameters. Comparing the two upper lines in Fig. 2,

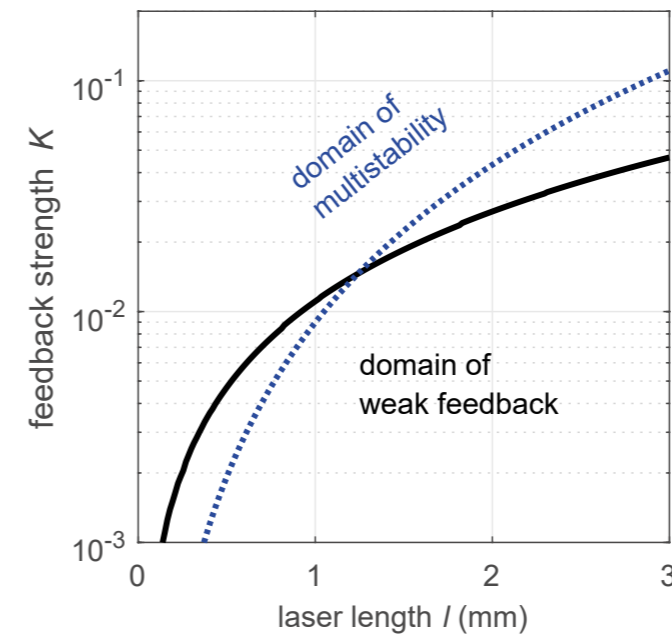


Fig. 3. Black (solid) and blue (dashed) lines represent the respective borders of weak feedback K_{weak} and multi-stability.

the laser with half cavity length experiences a five times larger chirp reduction factor. However, one should also keep in mind that a variation of the laser length results in a change of the low-frequency noise and the intrinsic spectral linewidth of the free-running laser, too.

The border of validity depends considerably on the DFB parameters as illustrated exemplarily in Fig. 3 for the DFB length l as representative parameter. This figure also shows the border of multi stability (dashed). Both borders are close to each other. Since multi stability can cause unwanted mode jumps, the feedback strength has been limited to K_{weak} in Fig. 2.

To validate the optimum chirp reduction factor determined, it was compared with measured data [2]. A white noise suppression by $F^2 \approx 4 \cdot 10^5$ with a finesse of ≈ 200 was achieved. Using curve $l = 1.5$ mm of Fig. 2, these values lead to $K \approx 0.07$, which is consistent with $K^2 < 1\%$ estimated experimentally. This value is already just beyond the border to strong feedback. A lot of dynamic instabilities would be expected to occur at such feedback levels for large-scale setups. However, a thorough theoretical bifurcation analysis of the miniature configuration under study reveals domains of stability at elevated feedback, in agreement with the experiment.

Diodenlaser mit einer ultraschmalen spektralen Linienbreite werden für immer mehr Anwendungen benötigt. Inhärente Rauschprozesse in konventionellen Diodenlasern führen allerdings zu Fluktuationen der Laserfrequenz und damit zu einer Verbreiterung der Laserlinie. Dies erschwert den Einsatz der Laser beispielsweise in der kohärenten optischen Nachrichtenübertragung. Werden frequenzstabilisierende Elemente wie Bragg-Gitter monolithisch integriert, lässt sich die Linienbreite signifikant reduzieren – jedoch nicht stark genug für die hochpräzise optische Messtechnik. Um die Linienbreite weiter zu verringern, kann die Laserfrequenz durch Kopplung mit einem externen Resonator sehr hoher Güte stabilisiert werden. Am FBH wurde nun ein theoretisches Modell entwickelt, mit dem sich die Reduktion der Frequenzfluktuationen und die dynamische Stabilität durch die externe Rückkopplung berechnen lassen. Der Vergleich mit experimentellen Ergebnissen ergibt eine gute Übereinstimmung.

Publications

[1] V. Tronciu, H. Wenzel, H. J. Wünsche, "Instabilities and bifurcations of a DFB laser frequency-stabilized by a high-finesse resonator," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 53, no. 1, pp. 1-9 (2017).

[2] W. Lewoczko-Adamczyk, C. Pyrlík, J. Häger, S. Schwertfeger, A. Wicht, A. Peters, G. Erbert, G. Tränkle, "Ultra-narrow linewidth DFB-laser with optical feedback from a monolithic confocal Fabry-Pérot cavity," *Opt. Exp.*, vol. 23, no. 8, pp. 9705-9709 (2015).

Progress in device design and technology for increased conversion efficiency in high-power diode lasers

Continuous performance improvement is needed in GaAs-based high-power broad area diode lasers (BALs), with increases in conversion efficiency η_E in strong demand. In 2017, FBH scientists performed studies to understand and address limits to η_E in two key areas, in both cases leading to increased performance. Here, we detail the approach followed and progress achieved in each of these areas:

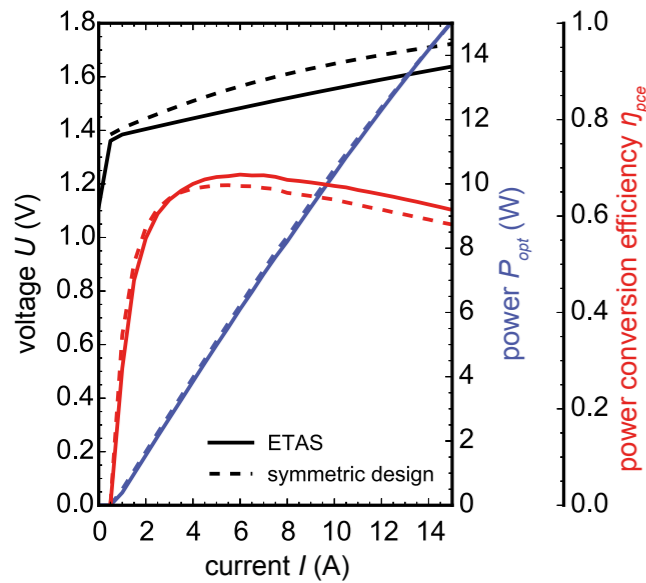


Fig. 1. CW 25 °C voltage, power and conversion efficiency as function of current for BALs ($L = 4 \text{ mm}$, $W = 100 \mu\text{m}$) with symmetric and ETAS epitaxial designs.

Progress 1: Extreme-triple-asymmetric (ETAS) epitaxial layer designs

FBH scientists developed advanced epitaxial layer designs in 2017 that allow BALs to operate for the first time with both ultra-low electrical resistance and excellent optical characteristics, increasing conversion efficiency by eliminating a key design limitation. Conventional epitaxial layer designs use symmetric waveguide and cladding layers, leading to low threshold current and high slopes. These layers, however, also cause high series resistance, lowering η_E especially at high powers (see Fig. 1). Series resistance, optical loss and leakage currents are dominated by the p-side of the device, due to its low mobility and high absorption. Extreme double asymmetric vertical designs (EDAS) with thin p-side layers, as shown in Fig. 2, suppress these effects. Yet they have lower optical gain, increasing threshold current, reducing peak η_E and degrading temperature sensitivity. FBH scientists therefore developed novel Extreme Triple ASymmetric (ETAS) epitaxial designs. Such designs introduce a third degree of asymmetry in the refractive index profile around the quantum well that enables the modal profiles to

be flexibly shaped with only minimal structural changes (see Fig. 2). Therefore, the gain can be increased without changing the p-side, simultaneously enabling low threshold, high slope and low resistance. In the most recent studies [1], ETAS epitaxial designs were grown with MOVPE and fabricated using standard processing techniques to realize high-power BALs with resonator length $L = 4 \text{ mm}$ and stripe width $W = 100 \mu\text{m}$ at operating wavelength $\lambda = 940 \text{ nm}$. Continuous wave (CW) testing at 25 °C of samples soldered p-down to standard heatsinks confirmed that these devices have peak $\eta_E = 69\%$ and maintain $\eta_E > 65\%$ to optical output power $P_{\text{opt}} = 11.4 \text{ W}$ – 3 percentage points improved compared to BALs using symmetric designs.

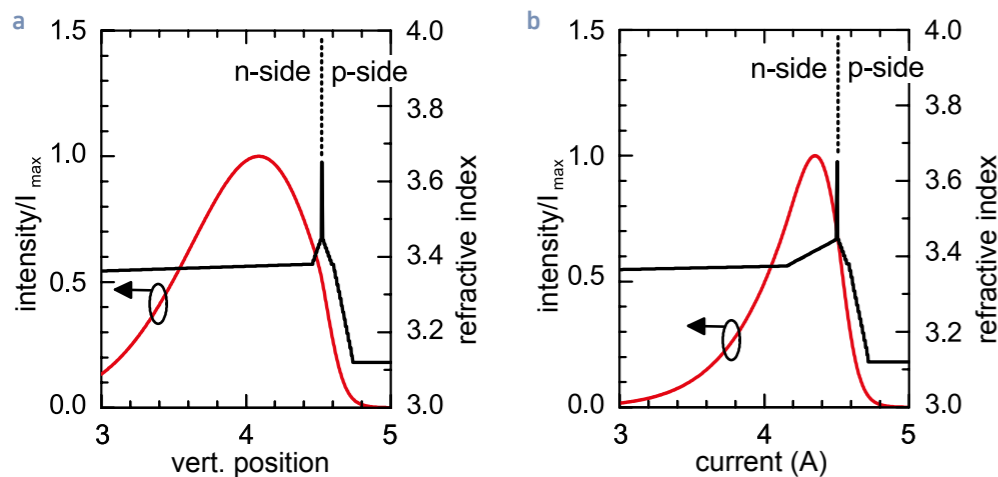


Fig. 2. Vertical refractive index profile and optical field profiles for (a) reference EDAS design and (b) an ETAS design that uses extra asymmetry around the quantum well to increase optical gain.

Progress 2: Buried mesa growth technology for GaAs-AlGaAs lasers

A novel in-situ-etched current-blocking technology has been developed, demonstrating that current losses at the edges of the laser stripes can be suppressed, thus increasing conversion efficiency by cutting off a key performance loss mechanism.

As current flows vertically through the chip from the narrow ($100 \mu\text{m}$) p-contact to the ($> 500 \mu\text{m}$)

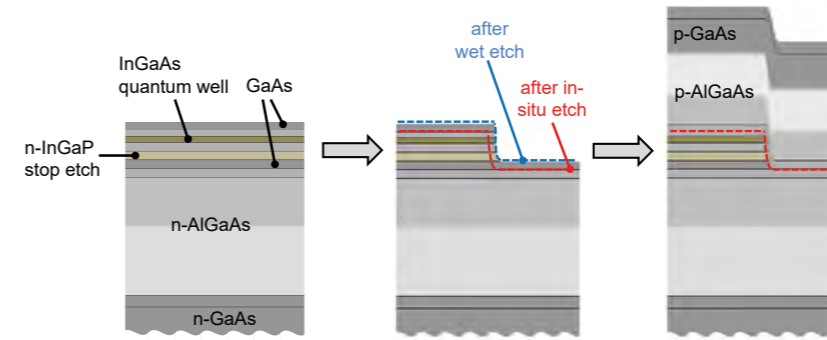


Fig. 3. Schematic of the fabrication of buried-mesa BALs: first epitaxy (l.), etching (ctr.), second epitaxy (r.).

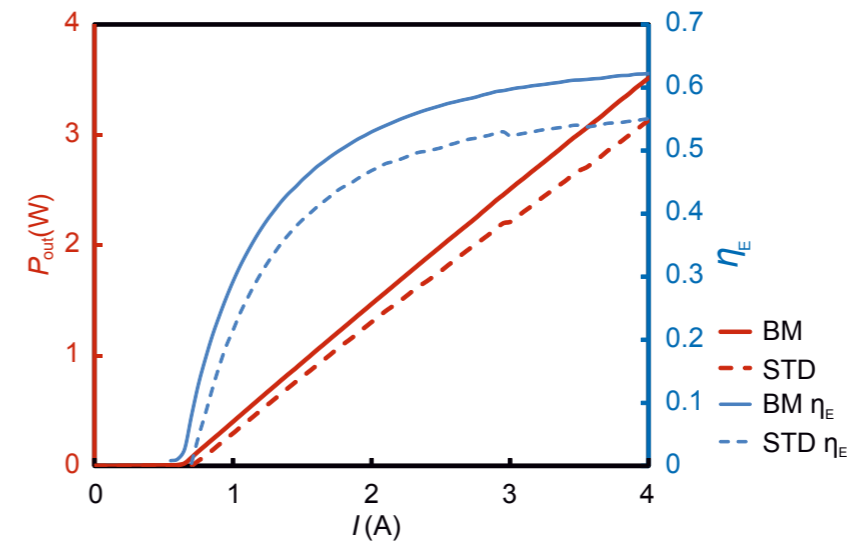


Fig. 4. CW 25 °C power and conversion efficiency as function of current for buried-mesa (BM) and reference (STD) BALs ($L = 4 \text{ mm}$, $W = 100 \mu\text{m}$).

significantly lower ($\sim 15\%$) threshold currents and higher ($\sim 5\%$) slope than reference lasers, increasing peak η_E by $> 5\%$, as shown in Fig. 4. Although the 2-step-epi still leads to additional losses, the importance of edge leakage is demonstrated and the benefit of two-step-epi BM technology is confirmed.

Eine hohe Effizienz ist bei GaAs-basierten Breitstreifen-Diodenlasern (BAL) essentiell, insbesondere wenn es um industrielle Hochleistungsanwendungen geht. Durch zwei neuartige, eigenständige Ansätze konnte die Effizienz dieser Laser am FBH gesteigert werden. Das FBH will beide Verfahren künftig integrieren und erwartet davon weitere deutliche Verbesserungen.

Progress 1: Mit einem maßgeschneiderten Halbleiterschichtstapel wurde der elektrische Widerstand von Diodenlasern gesenkt ohne die optischen Eigenschaften der BAL negativ zu beeinflussen. Hierzu wurde ein asymmetrisches Brechzahlprofil direkt um den Quantentrog eingeführt. Mit dieser Struktur konnte eine Spitzeneffizienz von 69 % im CW-Betrieb (940 nm, 25 °C) erreicht werden.

Progress 2: Ein zweistufiger MOVPE-Abscheidprozess wurde entwickelt, der ein neuartiges epitaktisches in-situ Ätzverfahren verwendet. Dieses reduziert den in den Flanken der BAL verlorenen (Leck-)Strom und erhöht damit die Steigungseffizienz und verringert den Schwellstrom. Auf diese Weise konnte die Spitzeneffizienz um mehr als 5 % erhöht werden.

Publications

[1] T. Kaul, G. Erbert, A. Maaßdorf, D. Martin, P. Crump, "Extreme Triple Asymmetric (ETAS) epitaxial designs for increased efficiency at high powers in 9xx-nm diode lasers", Proc. SPIE 10514, 105140A (2018).

[2] P. Della Casa, O. Brox, J. Decker, M. Winterfeldt, P. Crump, H. Wenzel, M. Weyers, "High-power broad-area buried-mesa lasers", Semicond. Sci. Technol. vol. 32, p. 065009 (2017).

High-power distributed feedback lasers with apodized surface gratings for improved performance and yield

High-power diode lasers with a narrow, stable spectrum are required for applications in materials processing, either directly or as a pump for solid-state or fiber lasers. Diode lasers with monolithically integrated gratings have the potential to dramatically simplify these systems and lower their manufacturing cost, provided performance and yield of the diode lasers is not compromised. In 2017, FBH scientists achieved significant progress in the development of such diode lasers. Specifically, broad area lasers with monolithically-integrated wavelength-selective distributed optical feedback (BA-DFBs) were reported, where the feedback is provided by novel apodized surface-etched Bragg gratings. In apodized DFB-BAs, the grating strength is varied along the resonator, thus significantly increasing fabrication yield and performance compared to reference uniform DFBs.

The Bragg gratings are fabricated by etching a series of periodically spaced V-shaped grooves into the surface of a fully-grown epitaxial wafer. These grooves provide a high refractive index contrast that leads to strong optical feedback and can potentially lead to high scattering losses. The feedback strength and losses depend on how far these grooves extend into the optical field, measured in terms of their offset from the active region (d_{res}). Both feedback and loss vary rapidly with d_{res} . We have therefore adapted the grating depth to the distribution

of the optical intensity along the resonator, to provide feedback only where it is needed, for minimal losses. This leads to an apodized grating design where d_{res} continuously increases from the rear facet (low optical intensity, small d_{res} , and high feedback) to the front facet (high optical intensity, large d_{res} , and low feedback).

The effectiveness of the apodized grating concept for DFB-BA lasers was demonstrated in devices operating at wavelength $\lambda = 975$ nm with long resonator $L = 6$ mm and narrow stripes $W = 30$ μ m. These devices build on structures developed within the BRIDLE project (www.bridle.eu). The depth of the grating grooves depends strongly on their size and aspect ratio (micro loading), which is determined by the size of the etching window in the grating mask. Therefore, a periodically patterned mask is formed on the wafer surface, making use of an e-beam tool, where the period is fixed, but the mask opening varies along the resonator. The V-grooves were next etched into the surface using dry-etch techniques, with the variation in mask opening leading to etch depth and hence d_{res} varying in a controlled manner along the resonator. In this way, the depth of the grooves can be individually tailored with only one etch step. After etching, the grooves are encapsulated by a dielectric layer. All other fabrication steps are the same as used for broad area lasers. The grating period is 5.7 μ m (40th order grating), and the grooves as well as their passivation cover < 20 % of the surface to minimize any increases in electrical resistance.

A direct comparison of the light-current-characteristic is shown in Fig. 1, which compares nominally identical lasers with uniform ($d_{res} = 740$ nm) and apodized gratings ($d_{res} = 725...755$ nm), mounted junction down on CuW carriers and tested continuous wave (CW) at 20 °C. The peak conversion efficiency of the apodized device is 60 % compared to 57 % achieved with uniform gratings. The spectral properties of the two grating types (Fig. 2) confirm wavelength-stabi-

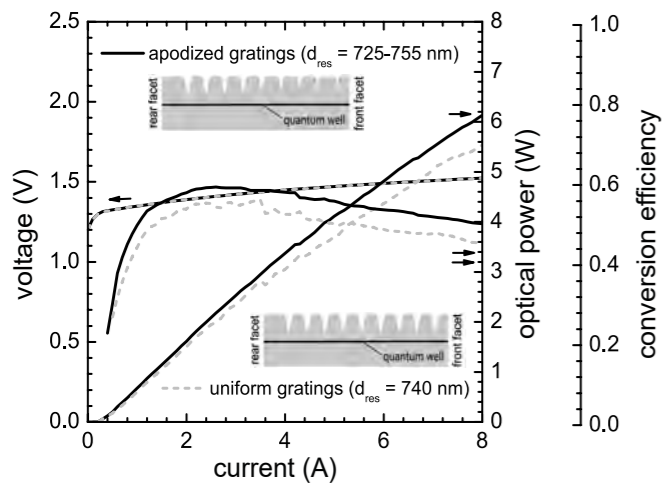


Fig. 1. Voltage, power and efficiency as function of current for apodized and uniform DFB-BA lasers. Inset: schematic cross section.

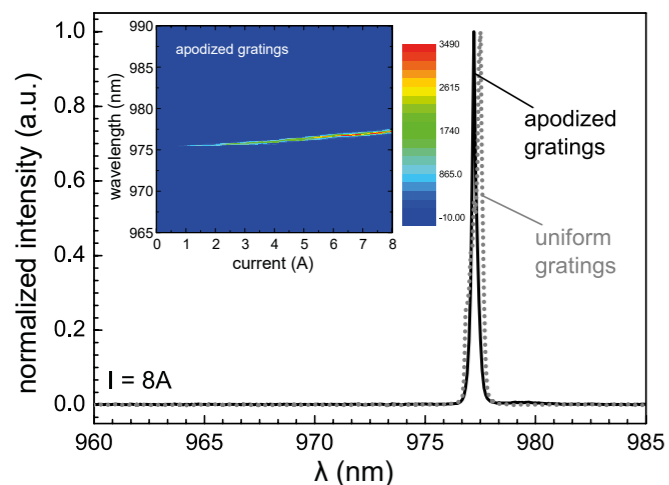


Fig. 2. Optical intensity as function of wavelength for apodized and uniform DFB-BA lasers at $I = 8$ A. Inset: Intensity (linear false color) as function of wavelength and current for an apodized DFB-BA laser.

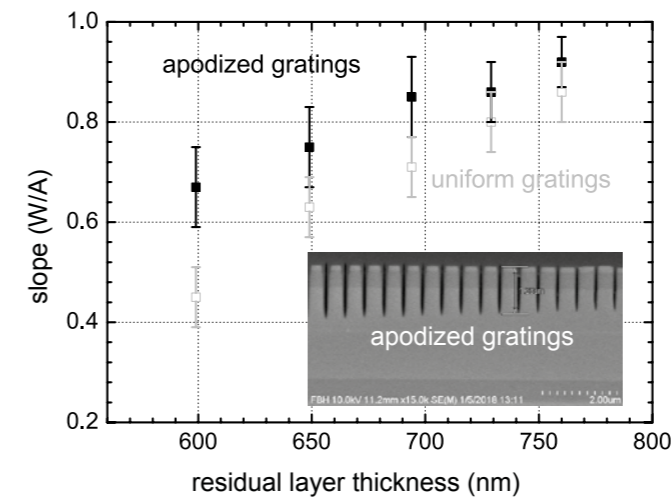


Fig. 3. Slope as a function of residual thickness for uniform and apodized DFB-BA lasers. Inset: SEM cross-section of an apodized grating (7th order, for better visibility).

lized operation without side modes or other instabilities for the whole measured current range up to $I = 8$ A. The FWHM spectral linewidth is < 0.5 nm with uniform gratings and < 0.3 nm in the case of apodization. In Fig. 3, the dependence of slope efficiency on d_{res} is shown for both grating configurations. The variation of slope with d_{res} is halved when apodized gratings are used, indicating significantly larger fabrication tolerance and yield.

In conclusion, improved grating design and technology for surface-etched BA-DFB lasers has been developed, with higher performance and yield demonstrated. These diode lasers are attractive components for use in future industrial laser systems.

Wellenlängenstabilisierte Hochleistungs-Laserdioden werden in vielen Bereichen der Materialbearbeitung eingesetzt, entweder direkt oder als Pumplaser. Mit monolithisch-integrierten Gittern lässt sich die Wellenlänge kostengünstig stabilisieren – sofern sie Leistung, Effizienz und Ausbeute nicht beeinträchtigen. Das Konzept der integrierten Gitter wurde von Wissenschaftlern des FBH so überarbeitet, dass die Herstellungstoleranz deutlich verbessert und die optische Leistung bei gleichbleibender Wellenlängenstabilisierung erhöht werden konnten. Hierzu wurde die Gitterstärke durch die Ätztiefe des Gitters an die Verteilung der optischen Intensität entlang der Resonatorachse angepasst. Diodenlaser mit entsprechend variiertem Ätztiefe zeigen im Vergleich zu Lasern mit homogen geätzten Gittern eine um 50 % niedrigere Empfindlichkeit gegenüber der Ätztiefe bei gleichbleibender spektraler Breite (< 0.5 nm). Damit sind Breitstreifenlaser mit apodisierten Gittern eine vielversprechende Technologie für zukünftige wellenlängenstabilisierte Hochleistungslasersysteme.

Publications

J. Decker, J. Fricke, A. Maaßdorf, G. Erbert, G. Tränkle, P. Crump, „Non-uniform DFB-surface-etched gratings for enhanced performance high power, high brightness broad area lasers“, Proc. SPIE 10086, Photonics West, San Francisco, USA, 100860R (2017).

J. Fricke, J. Decker, A. Maaßdorf, H. Wenzel, G. Erbert, A. Knigge, P. Crump, “DFB lasers with apodized surface gratings for wavelength stabilization and high efficiency”, Semicond. Sci. Technol., vol. 32, no. 7, pp. 075012 (2017).

High-power short-pulse laser sources for LiDAR systems

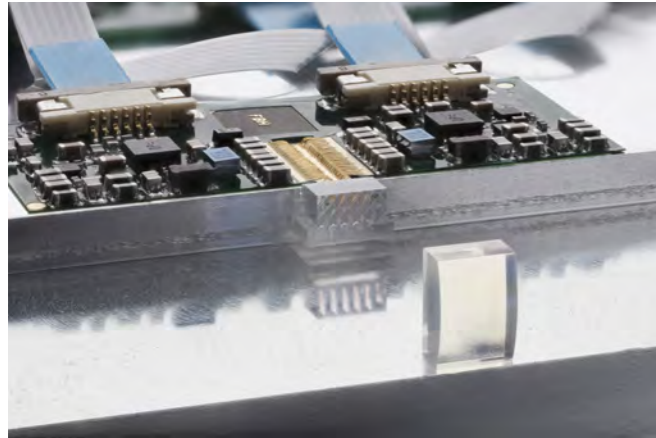


Fig. 1. High current laser driver with integrated DBR broad area laser diode.

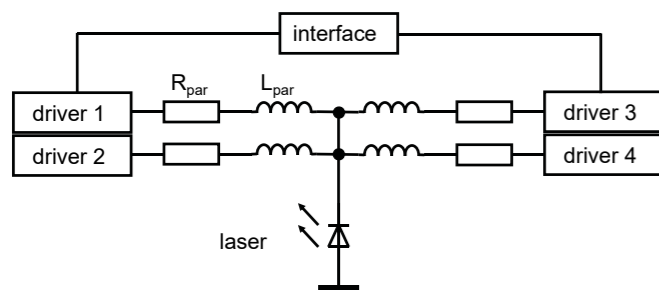


Fig. 2. Schematic of a group of four pulse drivers.

Autonomous driving is one of the main R&D targets of the automotive industry today. Despite major advances, various technical issues still need to be solved to make this technology secure under all traffic and environmental conditions. In particular, a variety of complementary sensors is required to obtain a comprehensive picture of the environment. In this context, LiDAR (Light Detection And Ranging) sensors have become a major topic, supplementing RADAR, video and ultrasonic sensors. Their functional principle is similar to RADAR but based on light. The short optical wavelengths provide the significantly higher spatial resolution needed for many automotive applications.

For LiDAR systems, pulsed light sources are needed, emitting at 905 nm wavelength with an optical pulse power that exceeds hundred watts at pulse widths from 2 to 10 ns. Moreover, good beam quality and low wavelength shift with temperature are required. New internally wavelength-stabilized distributed Bragg reflector (DBR) lasers based on AlGaAs (confinement and cladding layers) and InGaAs (active quantum well) were developed for this purpose. They are especially optimized for pulsed operation at very high injection current densities. The epitaxial layer structure including the active region is carefully optimized to obtain a high reflectivity of the DBR, thus locking the lasing wavelength to the Bragg wavelength over a wide temperature range. The fabricated 6 mm long DBR lasers have an emission aperture between 30 μm and 100 μm .

Shorter pulses offer higher local resolution and contain less energy, which is advantageous with respect to eye safety. To generate such short and powerful laser pulses, pulse drivers with a peak current value of some hundred amperes are needed. The unique challenge in this time range is how to deal with the parasitic inductances and capacitances. This includes circuit design as well as assembly of the system formed by laser diode and driver board. For this purpose, we have developed and patented methods to minimize assembly inductances. In this setup, the laser diode is directly mounted under the printed circuit without using bond wires. The board inductance is minimized by using board material of lowest height. [3]

Because high current level differences between output (drain) and input (gate) circuits occur, the design must carefully separate them. Due to their advantageous semiconductor material properties, transistors based on GaN offer the best ratio of input capacitances and

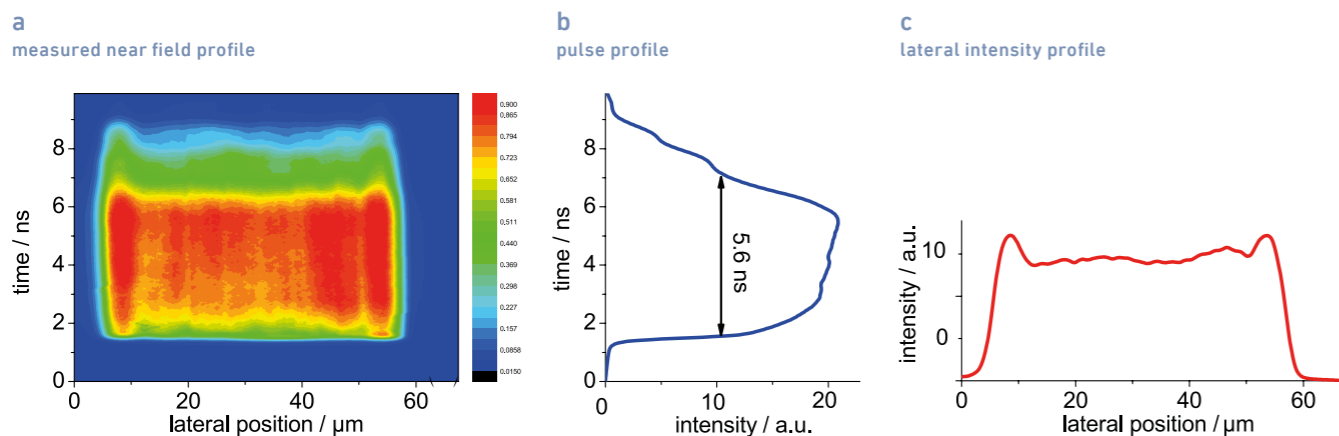


Fig. 3. Streak camera measurement of the optical output power (a), calculated pulse width (b) and calculated lateral intensity profile at a pulse peak power of 100 W.

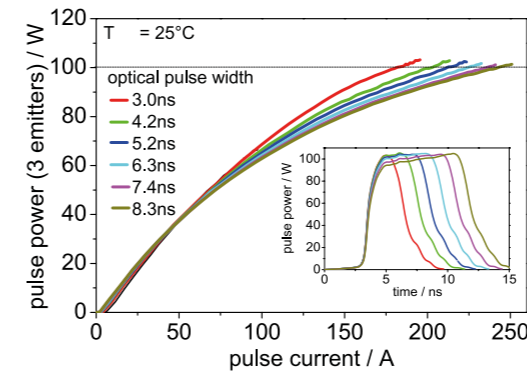


Fig. 4. Optical pulse power from a three emitter bar vs. driver pulse current, for different pulse lengths, using a quadruple pulse module. Inset: Maximum optical pulse power obtained as a function of current pulse width.

output current, enabling to realize the fastest switches in the high-current range. The high current density enables one to use devices with small footprint, which allows realizing compact layouts with low parasitic inductances. Since the material additionally features a low on-resistance it is possible to realize very efficient drivers. [3]

The optimum combination of CMOS low-level logic and GaN high-power technology is essential. By connecting four driver stages in parallel, the output current can be increased with similar timing behavior like a single driver. Fig. 1 shows the picture of a quadruple driver assembly with integrated DBR broad area laser diode and Fig. 2 the schematic of the connectivity. The output power of three emitters is collimated into one spot by optical components from FISBA Photonics. An interface circuit matches the driver to the respective application. The peak pulse currents are calculated from the measured average current and the duty cycle. The pulse width is taken from streak camera measurements (see Fig. 3a) of the optical output signal by integrating the data in lateral direction (Fig. 3b). Since laser current and

optical output power in the high current range are approximately proportional, it is possible to fit the current curve to the optical output power with acceptable accuracy. The lateral intensity profile at the output aperture is plotted in Fig. 3c.

The results of a quadruple driver module are shown in Fig. 4. 100 W optical pulse peak power are obtained in a pulse-width range between 3 ns and 10 ns, with pulse currents between 180 A and 250 A [1, 2]. The optical pulses (see inset) have an almost rectangular shape.

By combining the developed highly efficient pulsed current circuits, small and robust short-pulse laser drivers with pulse widths from 2.5 ns to 20 ns, repetition frequencies in the MHz range and peak currents of more than hundred amperes – depending on the configuration – can be realized. In this way, laser drivers were built that deliver unprecedented levels of output currents for such short pulses and with variable output pulse width. Moreover, with the drivers developed in the shorter pulse-width range (0.4 to 2 ns/30 A) and the longer one (25 to 100 ns/430 A), a laser driver toolbox is available that covers a wide range of pulsed-laser applications.

Part of this work was carried out within the *PLuS* project (Puls-Laser und Scanner für LiDAR-Anwendungen), which is part of the *Effiziente Hochleistungs-Laserstrahlquellen (EffiLAS)* framework, funded by the Federal Ministry of Education and Research.

Autonomes Fahren ist eines der großen Entwicklungsziele in der der Automobilindustrie, für das eine Fülle von Umgebungssensoren nötig sind. LiDAR (Light Detection And Ranging) nimmt dabei einen wichtigen Platz ein. Sein Funktionsprinzip entspricht dem des RADAR, jedoch ermöglicht die Verwendung von Licht eine deutlich bessere Raumaufklärung. Benötigt werden dafür gepulste Lichtquellen mit Pulsbreiten von 2 bis 10 ns und Leistungen über 100 W, bei einer Wellenlänge um 900 nm mit guter Strahlqualität. Das FBH hat erfolgreich derartige Pulsquellen entwickelt, die auf speziellen DBR-Laserdioden (Distributed Bragg Reflector) mit geringer Temperaturdrift bei 905 nm basieren. Bei den Strompulstreibern ist der Umgang mit den parasitären Induktivitäten und Kapazitäten im geforderten Zeit- und Strombereich besonders anspruchsvoll. Die am FBH entwickelten und patentierten Lasertreiber verwenden in der Endstufe GaN-Transistoren. Mit den realisierten LiDAR-Baugruppen konnten 3 - 10 ns optische Pulse mit mehr als 100 W optischer Leistung bei Pulsströmen von 180 bis 250 A erreicht werden.

Publications

[1] A. Knigge, A. Klehr, H. Wenzel, A. Zeghuzi, J. Fricke, A. Maaßdorf, A. Liero, G. Tränkle, "Wavelength-stabilized high-pulse-power laser diodes for automotive LiDAR", *Phys. Status Solidi A* 2018, 1700439, (2018).

[2] A. Klehr, A. Liero, H. Wenzel, A. Zeghuzi, J. Fricke, R. Staske, A. Knigge, "Pico- and nanosecond investigations of the lateral nearfield of broad area lasers under pulsed high-current excitation", *Proc. SPIE, Photonics West, San Francisco, USA, 101230D* (2018).

[3] A. Liero, A. Klehr, T. Hoffmann, T. Prziwarka, W. Heinrich, "GaN laser driver switching 30 A in the sub-nanosecond range", *46th European Microwave Conference (EuMC), London, GB, pp. 1389-1392* (2016).

Yellow laser sources for high-resolution confocal microscopy and ophthalmology



Fig. 1. Diode laser module emitting at 561 nm in a butterfly package.

Several applications in the fields of biology and medicine require yellow laser sources emitting at a wavelength around 561 nm. Confocal microscopes use such lasers for the scanned illumination of samples, a method increasing the resolution. In this way, processes within cells can be studied in detail, giving a better understanding and the chance of developing new medical treatments. The intense laser light can not only be used for diagnostics, but also as a tool for therapy. In ophthalmology, for example, detachment of retina in the human eye (retinopathy) can

be treated, therefore preventing the loss of eyesight.

Although strongly demanded, efficient and compact laser sources in the yellow spectral range are not available yet. Thus, the main aim of the project *YELLOW* was to develop such lasers. Second harmonic generation (SHG) in single-pass configuration was utilized to reach the yellow wavelength region, employing diode lasers with emission at 1122 nm, which offer a small footprint and high efficiency. The developed module shown in Fig. 1 provides more than 2 W optical power at 561 nm and is therefore ideally suited for the mentioned applications. An additional polarization-maintaining fiber output ensures that the module can be easily integrated into existing systems.

Module development starts with production and optimization of the diode lasers emitting at 1122 nm. Special requirements comprise high optical output power up to 10 W, a narrow emission spectrum, a high spatial beam quality as well as the capability for micro integration. The laser module is based on the master oscillator power amplifier (MOPA) concept. A ridge waveguide laser with distributed Bragg reflector (DBR-RWL) is used as MO, offering the mentioned emission characteristics, except for the high optical output power. A subsequent tapered amplifier (TPA) boosts the optical power from several ten milliwatts to the multi-watt level range. Fig. 2 illustrates the dependency of optical output power on increasing taper current of the MOPA system (black line).

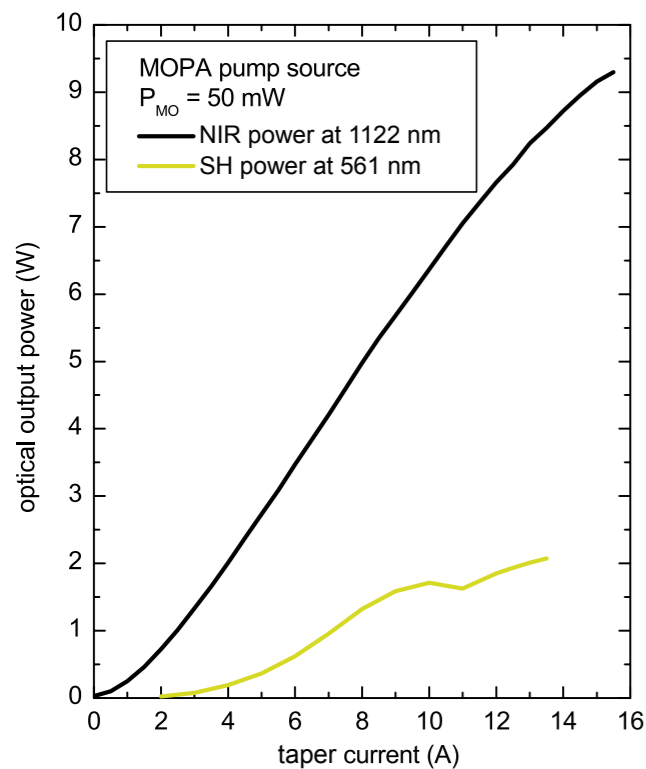


Fig. 2. Power-current characteristic of the near-infrared emitting master oscillator power amplifier pump source (black) and the corresponding second harmonic power at 561 nm (yellow).

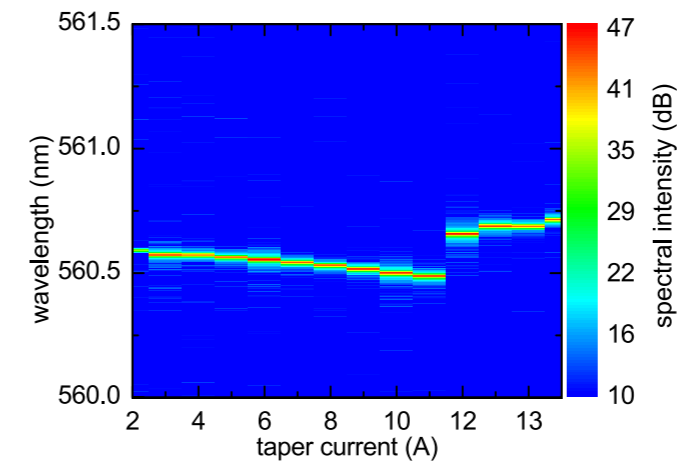


Fig. 3. Mapping of the emission spectra of the second harmonic emission from the laser module.

The second step in the development of the laser module is nonlinear frequency conversion. A periodically poled lithium niobate crystal converts the near-infrared laser light via SHG into the desired yellow spectral range. Since the efficiency of the conversion process depends strongly on the intensity of the pump light, a planar waveguide geometry of the crystal is used to confine the light in one dimension. Previous investigations have shown that thermal effects inside the crystal due to absorption have a high impact on the performance, especially at high optical powers. Therefore, an optimized crystal geometry and thermal management for the crystal were developed in this project. The crystal is wrapped in a copper holder while a thermal compound increases heat transfer and ensures precise control of the crystal temperature. As a result, more than 2 W optical output power could be realized. So far, this is the highest optical output power realized by SHG in a planar waveguide.

The SH optical output power is also shown in Fig. 2 (yellow line). At every working point, a spectral single-mode operation near 561 nm was observed; their emission spectra are presented in Fig. 3.

Finally, a suitable housing for the optimized individual components had to be developed. The FBH decided for a monolithic inlay that hosts all components and is placed in a butterfly housing; the inlay temperature is controlled by Peltier elements. Due to the monolithic design, a high mechanical stability is achieved. Moreover, several notches and edges allow the precise mounting of optical elements, like micro lenses and a fiber port at their respective positions. Both the inlay and the butterfly housing are designed to provide many mounting options for diverse laser sources and setups, yielding a technology platform for current and future micro-integrated laser sources.

This work was supported by the Federal Ministry of Education and Research in the framework of the InnoProfile initiative under Grant No. 03IP613FKZ.

Für die konfokale Mikroskopie und in der Augenheilkunde werden Hochleistungs-Laserquellen benötigt, die im gelben Spektralbereich um 561 nm emittieren. Im Projekt YELLOW wurden für derartige Anwendungen kompakte Lasermodule entwickelt. Als Basis für die Laserquellen wurden Diodenlaser entwickelt, die bei 1122 nm emittieren und optische Leistungen von bis zu 10 W erreichen. Deren Laserlicht wird mithilfe eines periodisch gepolten Litiumniobatkristalls mit planarem Wellenleiter in den gelben Frequenzbereich konvertiert. Limitierende thermische Effekte im Kristall konnten vermieden werden, indem dessen thermische Anbindung überarbeitet wurde. Auf diese Weise konnten mehr als 2 W Ausgangsleistung bei einer Wellenlänge von 561 nm demonstriert werden. Das Lasersystem ist in einem neu entwickelten, kompakten Butterflygehäuse untergebracht, das als Technologieplattform für aktuelle und zukünftige Systeme genutzt werden kann. Der polarisationserhaltende Faserauschluss ermöglicht die einfache Integration in industrielle Anwendungen.

Publications

N. Werner, G. Blume, D. Feise, F. Bugge, K. Paschke, G. Tränkle, "Spectral mode hop characteristics of ridge waveguide lasers with distributed Bragg-reflector", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 24, pp. 2183-2186 (2017).

R. Bege, D. Jedrzejczyk, G. Blume, J. Fricke, F. Bugge, K. Paschke, G. Tränkle, "Reduction of optical feedback originating from ferroelectric domains of periodically poled crystals", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 9000109 (2017).

Absolute wavelength-stabilized laser module emitting at 633 nm for interferometric ranging

Many interferometric and holographic applications rely on stabilized helium-neon (HeNe) lasers to generate coherent, visible light. However, the low gain of the HeNe gas requires long and fragile glass tubes, making the laser source at least shoebox-sized. Miniaturization to a size smaller than a mobile phone is therefore desired to facilitate application outside the lab. Changing the gain medium to semiconductor lasers is a new avenue to achieve further miniaturization. However, several challenges need to be overcome for a semiconductor laser module as well.

First, a single-mode, tunable semiconductor laser emitting in the visible spectral range with a narrow linewidth is required. The FBH therefore developed a ridge-waveguide laser with an internal distributed Bragg reflector (DBR-RWL). The laser emits a single longitudinal mode in the red spectral range with a linewidth in the order of about 1 MHz. Reliable operation of about 10 mW could be demonstrated; the wavelength was shifted via temperature over about 0.5 nm. Now, a resistive heater was additionally included next to the DBR grating, which allowed further tuning of the laser wavelength of around 1.0 nm. Thus, the total tuning range amounted to about 1.5 nm or 1,000 GHz.

Unfortunately, changing the temperature of the laser or the grating greatly influences the optical output power of the laser. To cope with this, a second chip had to be included into the module to amplify and stabilize the optical output power [3]. The RW power amplifier (RW-PA) chip features a Mg-doped AlInP p-side cladding, which improves the optical output power and greatly reduces its temperature sensitivity [4].

Another inherent drawback is the lower Q-factor of semiconductor edge emitters compared to HeNe laser resonators; this mandates an optical isolator to prevent feedback so that the laser line is not disturbed. Here, we successfully employed a custom-built miniaturized optical isolator, featuring a length of 15 mm and an outer diameter of only 5 mm. The optical isolator exhibits a transmission of about 50 % and more than 40 dB isolation (see Fig. 1).

By combining the laser, the amplifier and the optical isolator, we were able to build a miniaturized master-oscillator power-amplifier (MOPA) with a total length of about 32 mm on a micro-optical bench (MIOB). The MIOB was mounted on a Peltier element inside a sealed butterfly-type package with a footprint of 76 x 44 mm². This allows temperature stabilization of the MIOB independent of the external environment. At an external temperature of 25 °C and a MIOB

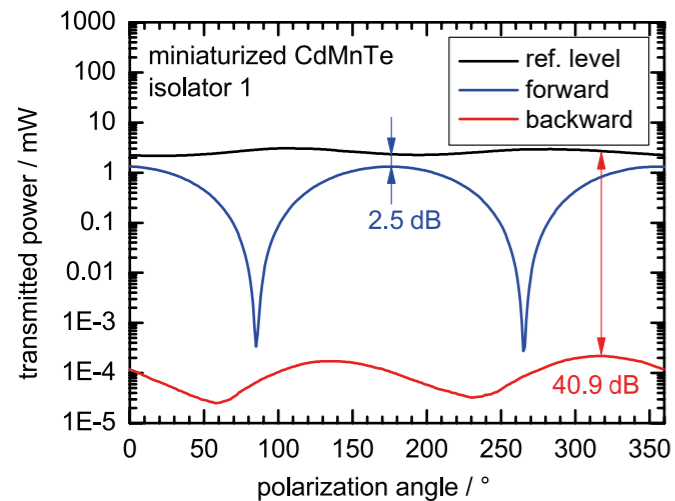


Fig. 1. Transmission through the miniaturized optical isolators in forward and backward direction as a function of polarization angle of the incident linear polarized laser light.

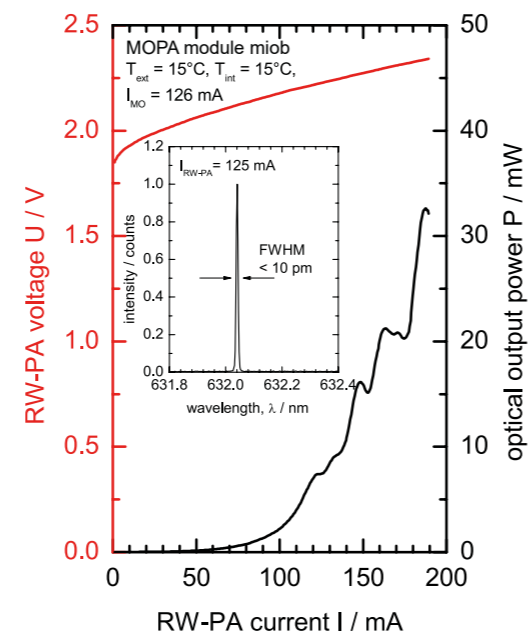


Fig. 2. Power-current characteristics of a MOPA consisting of a DBR RW laser and a RW power amplifier. The inset shows the spectral emission.

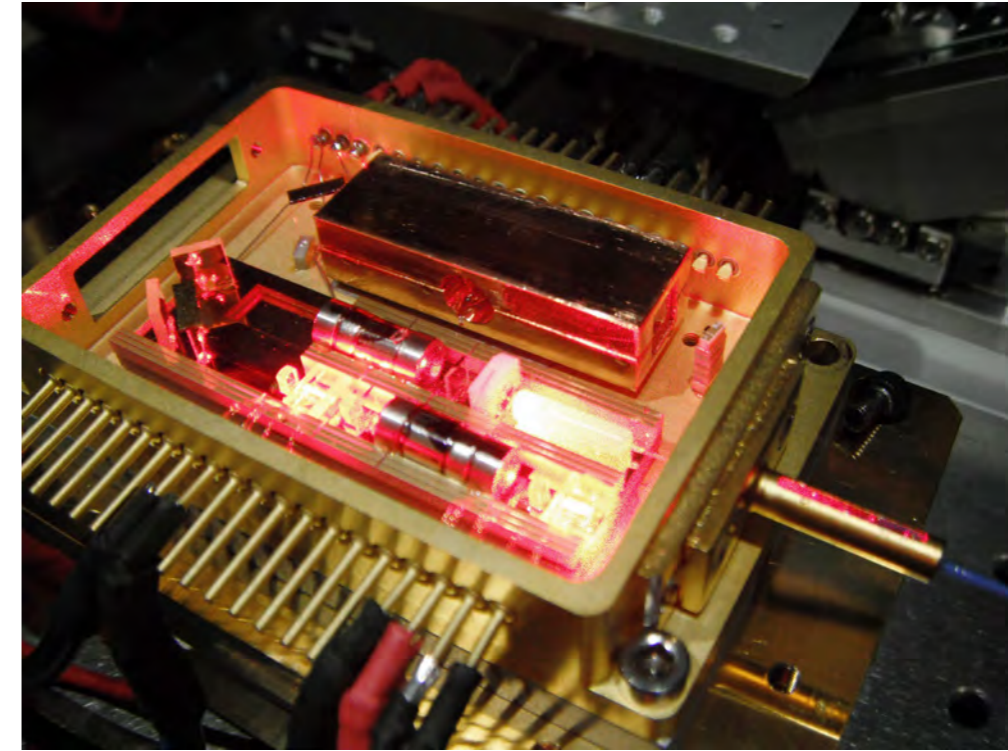


Fig. 3. Red-emitting MOPA module with a polarization maintaining fiber port and an iodine gas cell in a butterfly-type package.

temperature of 15 °C, the MOPA achieved an optical output power of up to 30 mW. The emission was single mode near 632 nm and could be tuned to 633 nm, while maintaining an almost constant optical output power (see Fig. 2) [1].

To stabilize the MOPA wavelength to a known, absolute frequency an iodine gas cell was included into the package and mounted on a separate Peltier element (see Fig. 3). The gas cell was heated to about 50 °C, and the laser frequency tuned across the absorption lines of the iodine gas. By using control electronics, our project partner was able to select a specific iodine absorption line and stabilize the emission of the MOPA to a known absolute frequency within a bandwidth of about 20 MHz [2].

Thus, we were able to demonstrate a semiconductor laser module sized even smaller than a mobile phone to provide a coherent, visible and absolute wavelength-stabilized radiation at 633 nm for interferometric ranging.

This work is supported by the Federal Ministry of Education and Research in the framework of the program KMU-innovativ: Photonik *FinDLiNG* (FKZ 13N13954).

Publications

[1] G. Blume, D. Jedrzejczyk, J. Pohl, D. Feise, A. Sahm, C. Nölleke, P. Leisching, K. Paschke, "633 nm single mode master-oscillator power-amplifier module", in Proc. SPIE 10528, 105280D (2018).

[2] C. Nölleke, P. Leisching, G. Blume, D. Jedrzejczyk, J. Pohl, D. Feise, A. Sahm, K. Paschke, "Frequency locking of compact laser-diode modules at 633 nm", Proc SPIE 10539, 1053907 (2018).

[3] G. Blume, J. Pohl, D. Feise, P. Ressel, S. Kreuzmann, A. Ginolas, A. Sahm, C. Kürbis, J. Hofmann, B. Eppich, G. Erbert, C. Nölleke, P. Leisching, K. Paschke, "Miniaturized red-emitting hybrid semiconductor MOPA modules with small-sized Faraday isolators", Conf. on Lasers and Electro-Optics/Europe and European Quantum Electronics Conf. (CLEO/Europe-EQEC 2017), Munich, Germany, cb-p.10 (2017).

[4] J. Pohl, F. Bugge, G. Blume, A. Knigge, S. Knigge, G. Erbert, M. Weyers, "Combined Mg/Zn p-type doping for AlGaInP laser diodes", J. Cryst. Growth, vol. 414, pp. 215-218 (2015).

Das FBH hat Diodenlasermodule im roten Spektralbereich entwickelt, die bei einer bekannten absolut-stabilisierten Frequenz bis zu 30 mW Leistung emittieren. Sie basieren auf Laserdioden, die 10 mW bei 633 nm emittieren und von einzelmodig bis zu 1,5 nm (1.000 GHz) durchstimmbare sind. Weiterhin wurden Verstärkerdioden entwickelt, die nur wenig temperaturempfindlich sind und mit denen die Leistung weiter gesteigert werden konnte. Erstmals standen auch neuartige, miniaturisierte optische Isolatoren zur Verfügung, so dass ein nur 32 mm langer Master-Oszillator Power-Amplifier (MOPA) auf einer mikrooptischen Bank realisiert werden konnte. Die mikrooptische Bank wurde in ein geschlossenes Gehäuse mit einer Grundfläche von 76 x 44 mm² montiert. Mit diesem MOPA konnte eine optische Ausgangsleistung von bis zu 30 mW bei einer internen Temperatur von 15 °C erreicht werden. Zusätzlich kann in das Gehäuse eine Iod-Gaszelle mit separater Temperatursteuerung integriert werden. Durch Tuning der Laserfrequenz über Absorptionslinien des Iodgases war es möglich, die Wellenlänge der Laserdiode absolut auf eine bekannte Frequenz mit einer Genauigkeit von 20 MHz zu stabilisieren. Dank dieser Präzision lässt sich das Modul als Strahlquelle für die interferometrische Entfernungsmessung benutzen.

Dual-wavelength diode lasers with adjustable wavelength distance

Tunable diode laser sources emitting at two individually adjustable wavelengths are required for applications such as Raman or absorption spectroscopy, terahertz frequency generation, and non-linear frequency conversion. In absorption spectroscopy, for example, two wavelengths are needed to measure inside and outside of an absorption feature to determine the concentration of substances under study. Also, in Raman spectroscopy, shifted excitation Raman difference spectroscopy (SERDS) can be used to separate between the wanted Raman signal and unwanted background signal from fluorescence or ambient light for an improved substance measurement.

FBH has been developing wavelength-stabilized light sources using DBR-RW lasers as well as dual-wavelength Y-branch DBR-RW with a fixed wavelength distance. The spectral distance of about 10 cm^{-1} was chosen for SERDS to address most solids and liquids. However, a flexible spectral distance between both excitation wavelengths was expected to improve the result of the SERDS technique, especially for biological material which can show Raman signals with significantly larger linewidths. Therefore, the laser concept was extended by implementing a common heater above the DBR section of the Y-branch DBR-RW laser as shown in Fig. 1.

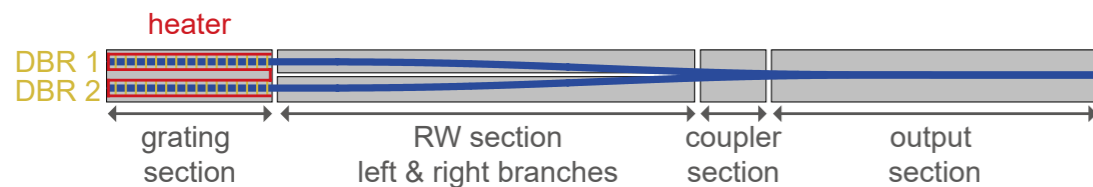


Fig. 1. Scheme of dual-wavelength Y-branch DBR-RW laser with implemented heater.

The device has a total length of 3 mm and contains four individually addressable sections. Within the grating section, two 10^{th} order DBR gratings with a spectral spacing of about $0.6 \text{ nm } 10 \text{ cm}^{-1}$ were manufactured using an i-line wafer stepper. Moreover, a heater implemented above the grating section allows spectral tuning via temperature. Typically, the gratings have a length of $500 \mu\text{m}$, and the spatial distance between the gratings is about $80 \mu\text{m}$. The RW section, the coupler section and partly the output section are formed using a sine-generated curve to form s-shaped bends over a length of about 2 mm. This enables a common output section and therefore a joint output aperture for both laser cavities.

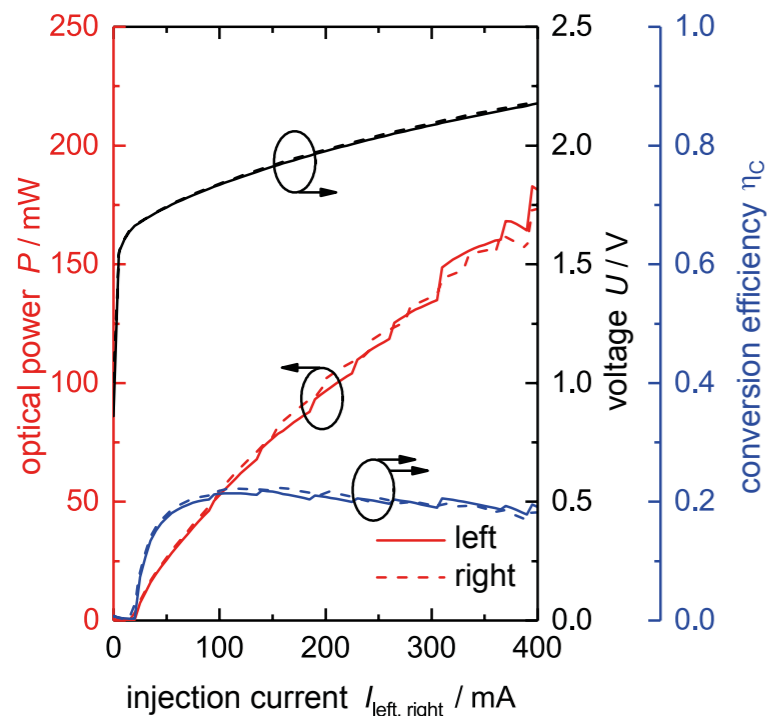


Fig. 2. Power-voltage-current characteristics for a Y-branch DBR-RW laser without heater operation at $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

The power-current characteristics of the two branches are shown in Fig. 2. The output section was operated at a current of 35 mA without connecting the coupler section. Laser operation for the two branches starts at a current of $I_{\text{left}} = I_{\text{right}} = 20 \text{ mA}$. The slope efficiency, determined between threshold and $P = 50 \text{ mW}$, amounts to 0.58 W/A . At an injection current of 400 mA, the output powers were close to 180 mW. The maximal conversion efficiency amounts to 0.22 at about 50 mW.

At an optical power of 100 mW and a temperature of $25 \text{ }^\circ\text{C}$, the spectral behavior of the device when changing the heater current over the DBR gratings is shown in Fig. 3. The devices operate in single mode with an emission width smaller than 13 pm, i.e., 0.2 cm^{-1} over the whole measurement range. With this narrow spectral width, the light sources meet the requirements for excitation sources used in Raman spectroscopy.

It can be seen that the spectral distance without heater current is 0.62 nm , as implemented within the process. When increasing the heater current up to 600 mA, the distance between the two wavelengths remains almost constant, though causing

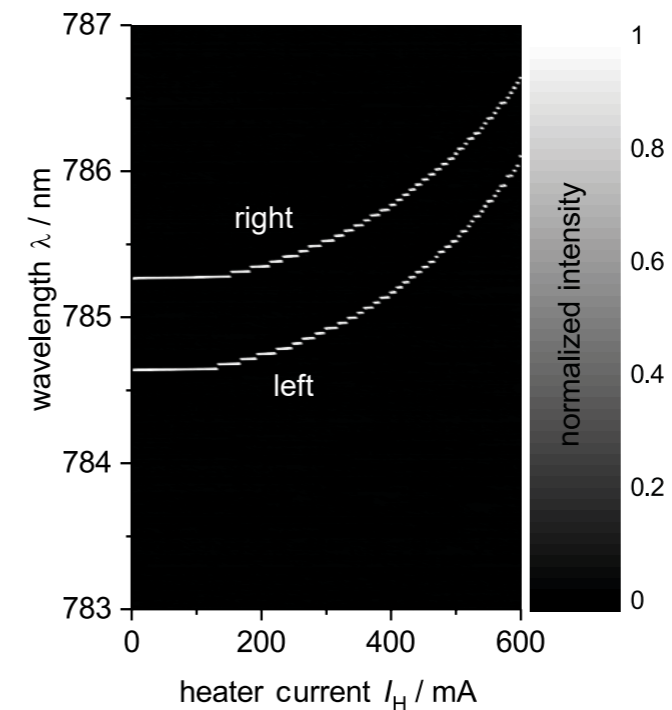


Fig. 3. Spectral tuning of the emission wavelength by the heater current at $P = 100 \text{ mW}$ and $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ for the two branches of the Y-branch DBR-RW laser.

a temperature-induced wavelength shift of about 1.36 nm for both emission lines. By using two different heater currents, the spectral distance between the two branches can be adjusted to the needs of the application up to a spectral distance of 2 nm . Within the measured heater current range, the output power showed only a weak decrease of about 5 %.

Results confirm that the two branches deliver the necessary two wavelengths for SERDS, and the implemented heater element allows a flexible adjustment of the spectral distance between both excitation lines for SERDS according to the width of the Raman lines under study. Raman spectroscopic experiments on red wine and ethanol showed the applicability of the devices [1], which are described in detail in [2, 3].

This work was supported by the European Commission within the project *MIB Multi-modal, Endoscopic Biophotonic Imaging of Bladder Cancer for Point-of-Care Diagnosis* (MIB 667933-2).

Mit durchstimmbaren Diodenlasern, die auf zwei Wellenlängen emittieren, lässt sich unter anderem Terahertz-Strahlung erzeugen. Auch für die Absorptionsspektroskopie und die Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS) werden sie benötigt. Letztere nutzt die Anregung des Raman-Effektes auf zwei unterschiedlichen Wellenlängen, um die schwachen Raman-Signale von störendem Hintergrundlicht, wie Tageslicht oder Fluoreszenz, zu separieren. Die Effizienz dieser Trennung hängt dabei von der Breite der untersuchten Ramanlinien im Verhältnis zum spektralen Abstand der beiden Anregungswellenlängen ab. Mithilfe eines Heizers, der oberhalb der Wellenlängenstabilisierenden Gitter implementiert ist, kann mit den Zwei-Wellenlängen-Diodenlasern ein Wellenlängenunterschied von bis zu 2 nm eingestellt werden – ohne Verluste bei der Ausgangsleistung und der spektralen Schmalbandigkeit. So können sowohl typische Flüssigkeiten und Festkörper, aber auch spezielles biologisches Material mittels SERDS effizient untersucht werden.

Publications

[1] B. Sumpf, J. Kabitzke, A. Müller, M. Maiwald, J. Fricke, P. Ressel, G. Tränkle, "Dual-wavelength Y-branch DBR-RW diode laser at 785 nm with an electrically tunable wavelength distance up to 2 nm", Conf. on Lasers and Electro-Optics/Europe and European Quantum Electronics Conf. (CLEO/Europe-EQEC 2017), Munich, Germany, ISBN: 978-1-5090-6736-7, cb-p.14 (2017).

[2] B. Sumpf, J. Kabitzke, J. Fricke, P. Ressel, A. Müller, M. Maiwald, G. Tränkle, "785 nm dual-wavelength Y-branch DBR-RW diode laser with electrically adjustable wavelength distance between 0 nm and 2 nm", Proc. SPIE 10123, Photonics West, San Francisco, USA, 101230T (2017).

[3] B. Sumpf, J. Kabitzke, J. Fricke, P. Ressel, A. Müller, M. Maiwald, G. Tränkle, "Dual-wavelength diode laser with electrically adjustable wavelength distance at 785 nm", Opt. Lett., vol. 41, no. 16, pp. 3694-3697 (2016).

Radiation tests of volume-holographic Bragg gratings for space deployment of narrow linewidth laser modules

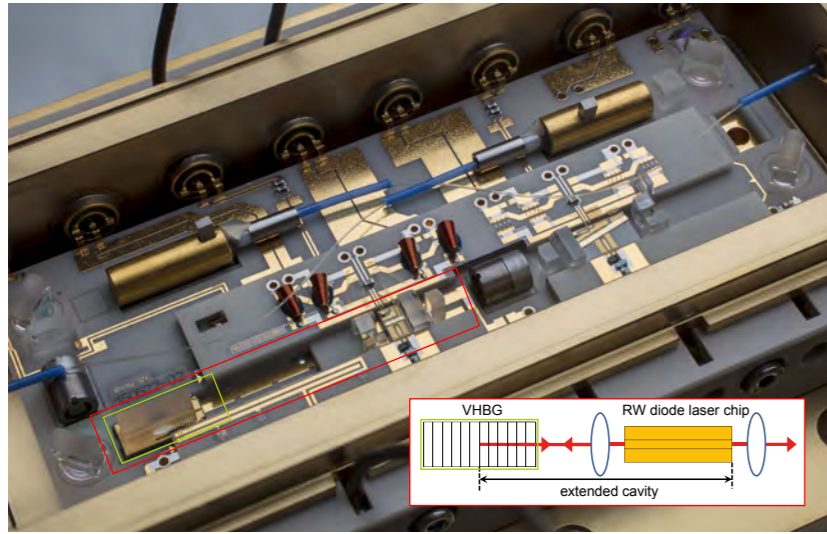


Fig. 1. ECDL using a VHBG (schematic see inset) as frequency-selective element.

It features a periodic refractive index modulation which implements the volume-holographic Bragg reflector providing frequency-selective feedback to the laser diode. This feedback determines the laser frequency and reduces the laser linewidth. A typical VHBG transmission function with corresponding function fit and residuals are depicted in Fig. 2. Frequency selectivity is determined by the Bragg frequency f_{Bragg} , the maximum diffraction efficiency η_{max} , and transmission T_{max} , which can be derived from the experimental data.

For deployment in spaceborne experiments, reliability of VHBGs under harsh environmental conditions is essential. Specific to space environmental stress is ionizing radiation that may impair the VHBG performance. It is known that γ -irradiation induces additional absorption in PTR glass mainly in the visible and UV spectral ranges. Radiation may also affect the background refractive index or the refractive index modulation depth of the VHBG, causing a shift of the Bragg

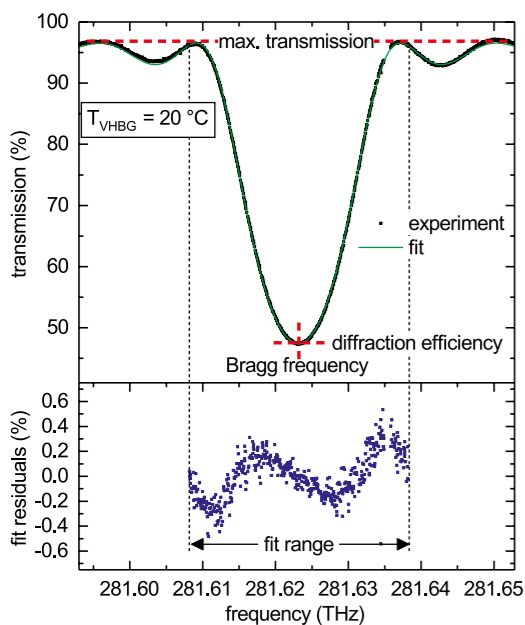


Fig. 2. Typical transmission function (black) with corresponding function fit (green) and fit residuals (blue) of a VHBG.

Spaceborne quantum optical sensors for high-precision measurements rely on compact and robust narrow linewidth laser systems [1]. Monolithic distributed feedback (DFB) or distributed Bragg reflector (DBR) lasers, while small in volume and resilient against mechanical and acoustic interference, do not meet the frequency stability requirements. One approach to enhance frequency stability is to provide optical feedback from a distant frequency selective reflector to a ridge-waveguide (RW) diode laser chip (extended cavity diode laser, ECDL) [2, 3]. Here, one cavity mirror was realized by a volume-holographic Bragg grating (VHBG), see Fig. 1.

The VHBG consists of a photo-thermo-refractive (PTR) glass made of sodium-zinc-aluminum-silicate doped with silver and fluorine.

To show that VHBGs can be properly operated in low-earth orbit (LEO), a total ionizing dose (TID) of 15 krad due to γ -irradiation has to be tolerated without shifting the Bragg frequency by more than 100 MHz. To investigate the VHBGs' radiation hardness, we used the Co60 source of the HZB (Wannsee).

The experimental setup employed is shown in Fig. 3. Measurement principle and setup were chosen with respect to minimize the influence of systematic errors such as incident angle on and temperature of the VHBGs. In the experiment, laser light with a wavelength around 1064 nm is coupled into a polarization-maintaining optical fiber. It is subsequently sent through a fiber circulator (OC), of which the second port is connected to a fixed fiber collimator (FFC), which acts as effective laser light source. The collimated free-space beam is then directed through a polarizing beam splitter (PBS) and a wedged plate beam splitter (WPB), which divides the beam into three parts. The beam transmitted through the WBS is directed onto a power meter (P_{IN}). With sufficient angular accuracy, the reflected beams are directed through the reference (REF) and the device-under-test's (DUT) VHBGs, which are mounted on a common temperature-stabilized heat sink. The frequency of the laser and optical power transmitted through the WBP and the two VHBGs (P_{IN} , P_{REF} and P_{DUT}) are recorded simultaneously. Bragg frequency (~ 281.623 THz), diffraction efficiency (~ 50.9 %) and transmission (~ 96.6 %) of the VHBGs are then determined by appropriately fitting the diffraction

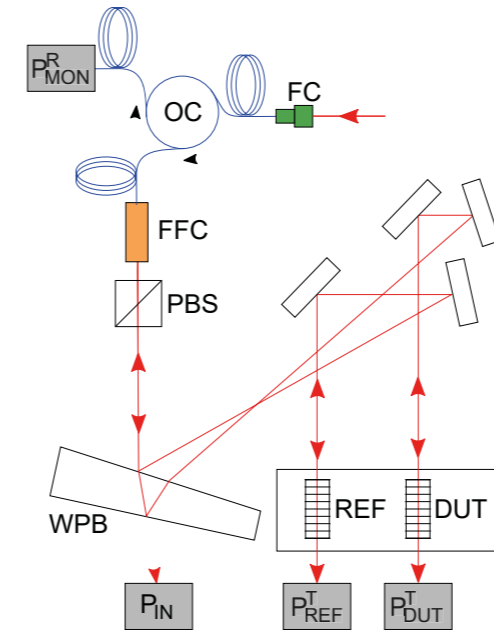


Fig. 3. Experimental setup. FC: fiber coupler, FFC: fixed fiber collimator, OC: fiber circulator, PBS: polarizing beam splitter, R: reflection, T: transmission, WPB: wedged plate beamsplitter.

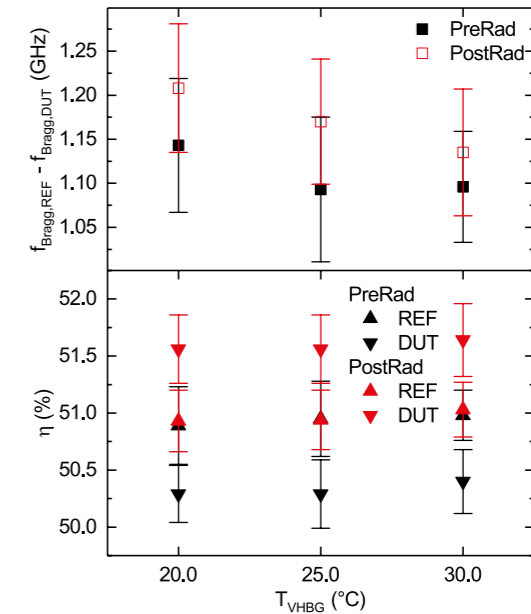


Fig. 4. Difference of Bragg frequency (top) and diffraction efficiency (bottom) of REF and DUT before (PreRad) and after (PostRad) γ -irradiation.

function to the measured data in a range of ± 15 GHz centered at the Bragg frequency. Differential analysis of REF and DUT results suppresses systematic uncertainties and provides information about potential shifts due to radiation influence.

Fig. 4 shows the difference between the Bragg frequency of REF and DUT and the modification of the diffraction efficiency before and after γ -irradiation for three VHBG temperatures, respectively. Analysis reveals a differential shift of the Bragg frequency of less than 80 MHz, which is well within the error budget, i.e., no frequency shift is observed. The diffraction efficiency of the DUT shows a statistically significant change of about 1.3 %, while that of the REF remains unchanged as expected.

The results underline the radiation hardness of the VHBGs for typical LEO applications. To further qualify the laser modules for space, other critical parts such as optical isolators and fiber feedthroughs will be investigated.

This work is supported by the German Space Agency (DLR) with funds provided by the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi) (Grant. No. 50WM1755).

Publications

[1] A. Dinkelaker, M. Schiemang, V. Schkolnik, A. Kenyon, K. Lampmann, A. Wenzlaski, P. Windpassinger, O. Hellmig, T. Wendrich, E. M. Rasel, M. Giunta, C. Deutsch, C. Kürbis, R. Smol, A. Wicht, M. Krutzik, A. Peters, "Autonomous frequency stabilization of two extended-cavity diode lasers at the potassium wavelength on a sounding rocket", *Appl. Opt.* 56 (5), pp. 1388- 1396 (2017).

[2] A. Wicht, A. Bawamia, M. Krüger, Ch. Kürbis, M. Schiemang, R. Smol, A. Peters, G. Tränkle, "Narrow linewidth diode laser modules for quantum optical sensor applications in the field and in space", *Proc. of SPIE* 10085, 100850F-1 (2017).

[3] H. Christopher, B. Arar, A. Bawamia, C. Kürbis, W. Lewoczko-Adamczyk, M. Schiemang, R. Smol, A. Wicht, A. Peters, G. Tränkle, "Narrow linewidth micro-integrated high power diode laser module for deployment in space", *Proc. IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS 2017)*, 1570362376 (2017).

Quantenoptische Sensoren im Weltraum benötigen kompakte und robuste Lasersysteme mit schmalen Linienbreiten. Die Frequenzstabilität der dafür verwendeten Lasermodule lässt sich etwa mit volumen-holographischen Bragg-Gittern (VHBG) in einem Extended Cavity Diode Laser (ECDL) verbessern. Das VHBG bestimmt durch frequenzselektives optisches Feedback in einen Diodenlaserchip dann die Frequenz und Frequenzstabilität der ECDLs. Voraussetzung für den Einsatz im Weltraum ist die Beständigkeit der optischen Eigenschaften der VHBGs unter weltraumspezifischen Bedingungen – wie etwa dem Einfluss von elektro-magnetischer Strahlung. In einem DLR-finanzierten Projekt hat das Ferdinand-Braun-Institut die Auswirkungen von Gamma-Strahlung auf die VHBGs untersucht. Im Rahmen der Messgenauigkeit verschob sich weder die Bragg-Frequenz und – wie erwartet – änderte sich die Beugungseffizienz nur wenig. Damit wurde die Strahlungshärte der VHBGs für Anwendungen in einem niedrigen Orbit gezeigt.

Laser frequency stabilization with resonant optical feedback from a photonic integrated circuit

Ultra-narrow linewidth lasers are key components for a variety of applications, ranging from optical communications and integrated quantum technology to fundamental physics experiments. Recent advances in micro-integrated diode laser based systems have proven that semiconductor lasers can meanwhile reach laser linewidth and frequency noise figures of merit comparable to those of solid-state lasers. Ultra-narrow linewidth diode laser systems therefore provide a promising alternative and score with unique advantages: compactness, robustness, energy efficiency and price.

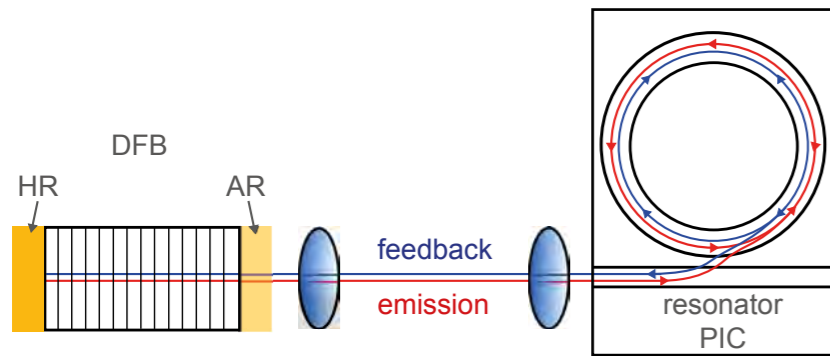


Fig. 1. Schematic of the resonant feedback concept. Light is emitted from the laser to the resonator (red) and feedback (blue) back into the laser.

A common approach to reduce the frequency noise of a semiconductor laser is to provide feedback from an external source such as mirrors or optical gratings. In these laser systems, the optical linewidth can be reduced from tens of MHz of a free-running diode laser to less than 50 kHz. Even more noise reduction can be achieved by means of the more complex concept of resonant optical feedback, where a dedicated external optical cavity coupled to the diode laser provides resonant optical feedback (see Fig. 1). When the emission frequency of the diode laser matches the resonance frequency of the external cavity, light is coupled into the resonator and back to the diode laser. This optical feedback signal locks the laser frequency to the external resonator resonance frequency, thereby reducing laser noise and stabilizing diode laser frequency. Diode laser systems that employ resonant optical feedback have been shown to surpass the noise merit of extended cavity diode laser (ECDL) systems based on Bragg reflectors by several orders of magnitude.

To compensate for the increasing complexity of the optical system, photonic integrated circuit (PIC) chips are an attractive option to enable further micro integration. The Ferdinand-Braun-Institut teamed up with the Nano Optics group at the Humboldt Universität zu Berlin and two local SMEs, Brilliance Fab Berlin GmbH and PicoQuant GmbH, to develop a PIC platform for evanescent waveguide-coupled passive optical whispering-gallery type resonators on a chip. One goal is to demonstrate a narrow-linewidth micro-integrated resonant optical feedback diode laser module in which the resonant feedback is provided by a resonator PIC.

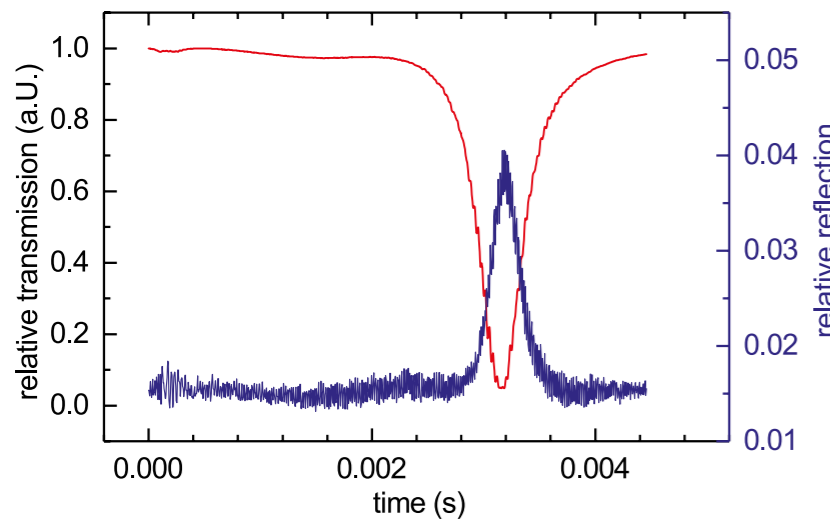


Fig. 2. Normalized transmission (red) and reflection (blue) signal from a resonator chip.

Resonator and waveguide are designed and fabricated on thermally grown silica on silicon wafers at FBH. The process employs a combination of fluorine-based reactive ion etching and plasma etching to fabricate suspended rib waveguide and resonator structures. For more details see p. 122.

The micro-resonator PIC features a ring resonator with a diameter of 500 μm , which is phase-matched to an evanescent coupling waveguide designed to operate close to the critical coupling regime. Fig. 2 shows a typical transmission and reflection signal measured by sweeping the laser frequency continuously. The transmission dip drops down to almost zero, indicating that the coupling is close to critical. The reflected power on resonance (blue signal in Fig. 2) is measured to be

approximately 4 % of the incoming power. Typical Q-factors achieved were around $\sim 5 \cdot 10^5$, the best Q-factor was about $1 \cdot 10^6$.

We use a 1.5 mm long, single quantum well AlGaAs distributed feedback (DFB) diode laser with 1064 nm wavelength, which was designed and fabricated at the FBH. The DFB diode laser uses a high reflectivity coating on the front and an antireflection coating on the rear facet (see Fig. 1). Coupling between the laser diode and the resonator chip is realized by means of micro-optical lenses, positioned by piezo actuators. To determine the frequency noise power spectral density (PSD), we use a self-delayed homodyne beat-note measurement that superimposes the laser output with a split and delayed second signal from the same laser on a fast photo detector. The resulting beat-note signal is recorded with an RF-spectrum analyzer and frequency noise PSD is extracted with an IQ-based method.

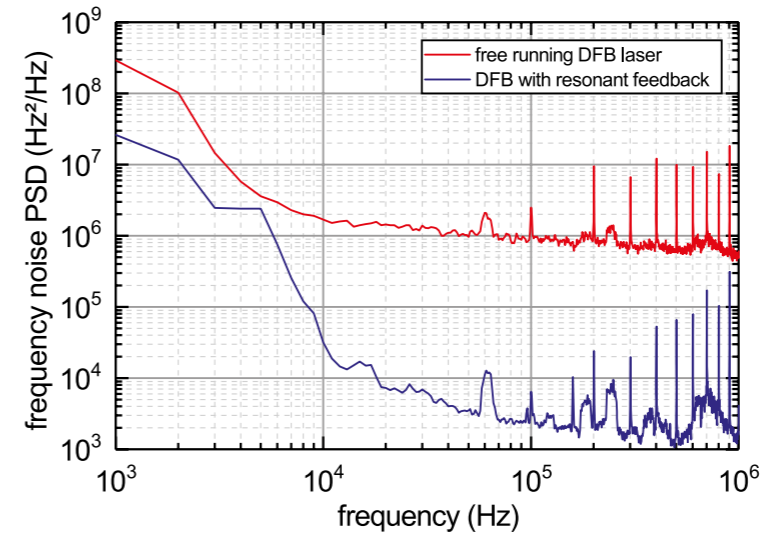


Fig. 3. Frequency noise power spectral density comparison: free-running DFB laser (red) and DFB laser with resonant optical feedback (blue).

Fig. 3 shows the resulting frequency noise PSD spectra for the free-running DFB laser compared to the same DFB laser that is locked to the resonator chip by resonant optical feedback. The laser noise of the free-running laser is reduced by nearly three orders of magnitude, with a corresponding Gaussian linewidth reduced from 1.4 MHz to 40 kHz, just surpassing typical discrete ECDL systems. Work is ongoing to reach the frequency stability demonstrated with discrete laser setups.

This work is supported by the European Fund for Regional Development (EFRD), grant no. IBB 101 59465.

Ultra-schmalbandige Laser sind eine Schlüsselkomponente für vielfältige Anwendungen, von der Satellitenkommunikation über die integrierte Quantentechnologie bis hin zu Präzisionsexperimenten in der Grundlagenforschung. Um die dafür notwendigen Linienbreiten mit Halbleiterlasern zu erreichen, nutzt das FBH das Verfahren der resonanten optischen Rückkopplung. Dabei wird der Laser resonant an einen schmalbandigen externen Resonator gekoppelt. Das Institut hat in einem lokalen Verbundprojekt einen solchen externen Resonator aus thermischem Oxid entwickelt, der zusammen mit einem evaneszenten Koppler auf einem Chip integriert ist. Diese monolithisch-integrierten Chips sind vollständig halbleitertechnologisch hergestellt und erreichen eine Rekordgüte von 1×10^6 . Damit konnte die Linienbreite der Diodenlaser bereits von 1,4 MHz auf 40 kHz reduziert werden, was der typischen Performance von External Cavity Diode Lasern entspricht.

Photocurrent spectroscopy and capacitance-voltage analysis of UV LEDs during lifetime tests

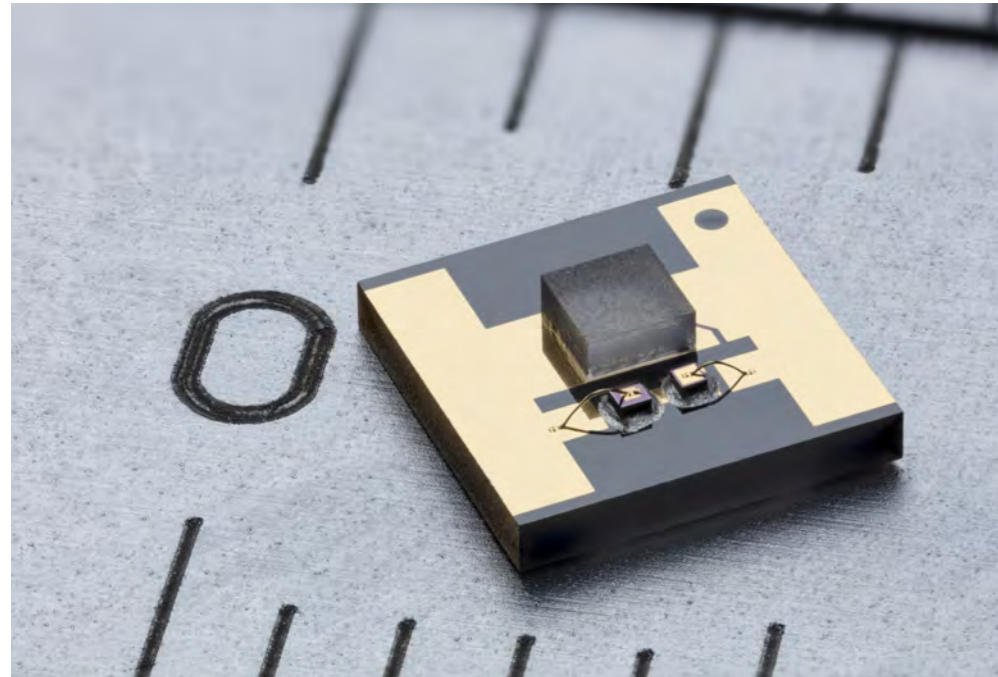


Fig. 1. Typical image of a flip-chip mounted UV LED on an AlN ceramic submount.

AlGaIn-based UVC light-emitting diodes (LEDs) radiating in the spectral region between 200 - 280 nm offer remarkable properties, such as tailored wavelength and low voltage operation. They are therefore expected to replace conventional UV radiation sources in many applications including water purification. However, the lifetime of these devices is still limited to a few 1,000 hours, and the underlying degradation mechanisms are not yet fully understood. Commonly, the generation or propagation of defects within the LED heterostructure and an associated increase of non-radiative recombination are assumed to be the dominating degradation mechanisms. However, the involved defect species as well as the exact nature and localization of the degradation processes are not finally clarified, which motivates new approaches and combination of analysis methods.

Accordingly, UVC LEDs with peak emission at 265 nm are being developed within the Joint Lab GaN Optoelectronics of FBH and the Institute of Solid State Physics at TU Berlin. A batch of

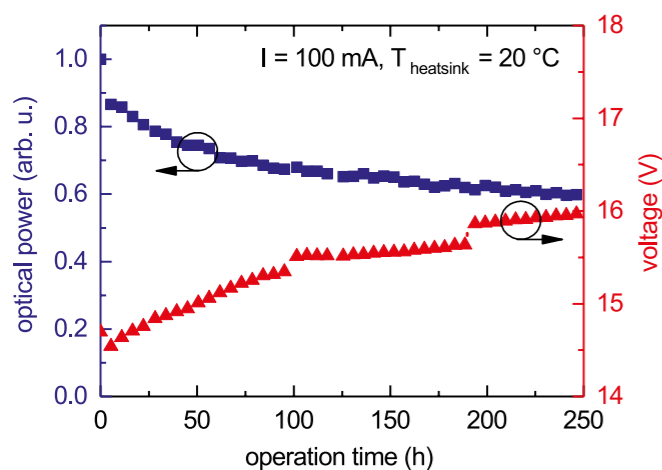


Fig. 2. Integrated optical power (normalized to $t = 0$ h) (decreasing) and drive voltage (increasing) during operation of a representative UVC LED stressed at 100 mA and 20 °C.

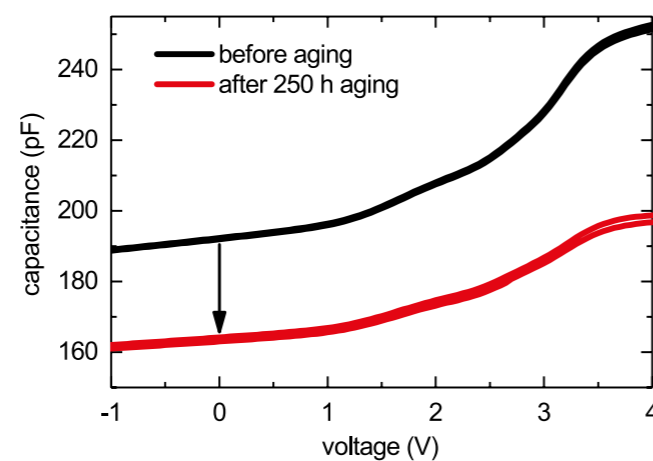


Fig. 3. C-V characteristics measured as hysteresis between -1 V and 4 V before and after 250 h of operation at 100 mA and 20 °C.

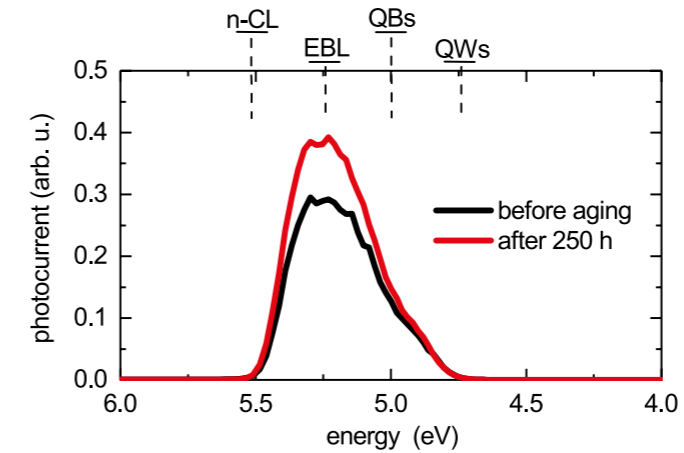


Fig. 4. Photocurrent spectra of a representative 265 nm UVC LED operated as photodetector at 0 V bias before and after 250 h of operation as LED at 100 mA and 20 °C. The photocurrent increases at energies that can be assigned to the layers surrounding the active region.

samples was operated for 250 h at a constant DC current of 100 mA and a stable heatsink temperature of 20 °C. Simultaneously, emission spectra and drive voltage of the LEDs were measured in regular intervals. This revealed that the optical power gradually decreases whereas the voltage increases over 250 h of operation (Fig. 2).

By combining capacitance-voltage (C-V) characterization and photo-current spectroscopy it is possible to gather important information about the defect species involved in the degradation and to precisely locate it. C-V measurements were performed using an LCR meter operated at a frequency of 1 MHz. The results shown in Fig. 3 indicate that the overall capacitance decreases over time. Such an effect suggests a reduction of the free carrier concentration in one of the structure's space-charge regions (SCR). However, in addition to the SCR of the p-n junction other SCRs form at the Schottky-like contacts. Thus, a clear allocation from C-V measurements alone is not possible.

If operated without bias, the LEDs work as p-n photodetectors. By analyzing their spectral photocurrent response additional information can be gained. Fig. 4 shows spectra of the photocurrent before and after stress, obtained by operating the LEDs as photodetectors. They were excited at defined wavelengths incident from the polished sapphire backside, and the photocurrent was measured using a pico-ampere meter. The upper x-axis shows the absorption edge of the individual layers in the heterostructure calculated from the measured band edge of bulk $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ layers (grown on sapphire substrates by MOVPE) as well as bowing parameters and corresponding absorption coefficients. The spectral feature at 5.25 eV can be assigned to absorption in the barriers (QB) surrounding the emitting QWs and thus to the p-n SCR. Hence, the increase of the photocurrent at 5.25 eV is most likely induced by a widening of the n-side of the SCR due to compensation of the intended n-doping via generation (or diffusion) of acceptor-like point defects, such as magnesium or group-III vacancies, in the active region. These defects can act as non-radiative recombination centers which explains the decrease in optical power. In addition, compensation of the intended n-doping by the acceptor-like point defect leads to a reduced n-conductivity and thus an increase of the drive voltage.

In summary, the combination of photo-current spectroscopy and capacitance-voltage characterization offers new insights into degradation processes of AlGaIn-based UV LEDs. This knowledge is currently used to optimize the UV LEDs in terms of lifetime and reliability.

This work was partially supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under contracts 03ZZ0106A, 03ZZ0106B, 03ZZ0130A and 03ZZ0130B within the *Advanced UV for Life* consortium. Further support was given by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) through the project *UV-Berlin* under contract 03EFCBE067 as well as by the Deutsche Forschungsgemeinschaft within the Collaborative Research Center Semiconductor *NanoPhotonics* (CRC 787).

Leuchtdioden mit Emission im UV-C-Spektralbereich zwischen 200 nm und 280 nm könnten dank ihrer vorteilhaften Eigenschaften konventionelle UV-Strahlungsquellen in verschiedenen Anwendungen ersetzen. Jedoch ist die Lebensdauer dieser LEDs noch auf einige 1.000 bis 10.000 Stunden begrenzt, und die physikalischen Degradationsmechanismen sind nicht vollständig verstanden. Insbesondere über die Lokalisierung der Degradationsprozesse, aber auch über die genaue Art der Defekte ist noch sehr wenig bekannt. Daher wurden Kapazitäts-Spannungs-Charakteristiken und Fotostrom-Spektren miteinander kombiniert und analysiert. So konnte nachgewiesen werden, dass mit Abnahme der optischen Leistung und Zunahme der Betriebsspannung bei konstantem Strom vermehrt akzeptorartige Defekte, wie zum Beispiel Magnesium- oder Gruppe-III-Vakanzen, auf der n-Seite der aktiven Zone auftreten. Das entwickelte Verfahren und die daraus gewonnenen Kenntnisse werden aktuell genutzt, um die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von UV-LEDs weiter zu verbessern.

Publication

J. Glaab, J. Haefke, J. Ruschel, M. Brendel, J. Rass, T. Kolbe, A. Knauer, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Guttman, Ch. Kuhn, J. Enslin, T. Wernicke, M. Kneissl, "Degradation effects of the active region in UV-C light-emitting diodes", *J. Appl. Phys.* 123, 104502 (2018).

UVB LEDs with improved power and lifetime

(In)AlGaN-based light emitting diodes (LEDs) for the ultraviolet B (UVB) spectral range (280 nm - 320 nm) are promising candidates for replacing established UV light sources in various applications. These include medical diagnostics, phototherapy, and plant growth lighting. However, despite the enormous progress that UVB LEDs have made, their performance is still suffering from the relatively high defect densities in these materials and poor carrier injection efficiencies. Today, the best UVB LEDs exhibit an external quantum efficiency of only a few percent and a typical lifetime of some 1,000 h. Optimization of the LED heterostructure, especially of the quantum well active region and the electron blocking layer (EBL), is one way to increase efficiency and lifetime of UVB LEDs. The radiative recombination rate in the active region, for example, can be influenced by design and perfection of the active region. Efficiency of the carrier injection is mainly determined by the Mg-doped AlGaIn EBL that prevents electron leakage into the p-doped layers without impairing efficient hole injection into the quantum wells. The EBL design and its doping profile also have a large influence on the lifetime of the LEDs.

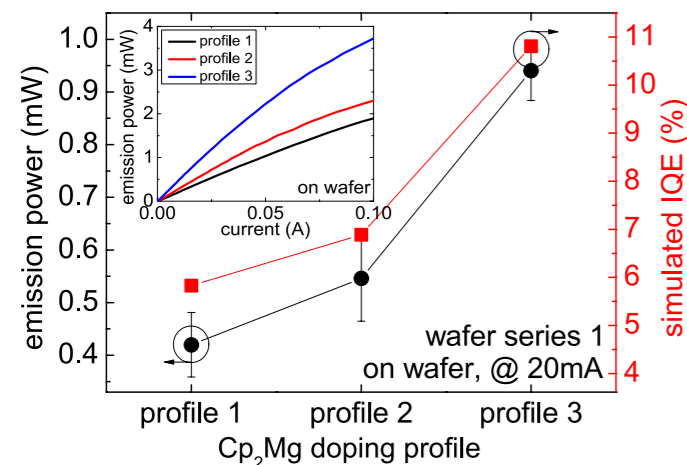


Fig. 1. Measured average emission power as well as simulated internal quantum efficiency (IQE) of 310 nm LEDs with different Cp_2Mg doping profiles in the EBL. Inset: Typical emission power vs. current characteristics.

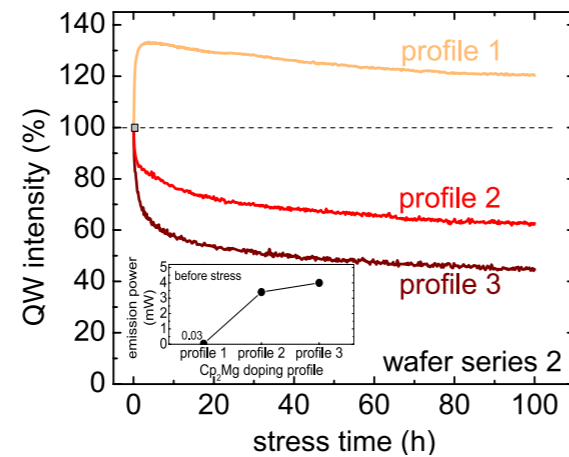


Fig. 2. Temporal evolution of the emission power of 310 nm LEDs with different Cp_2Mg doping profiles in the EBL operated at 100 mA and 20 °C. Inset: Absolute initial emission power at 0 h.

We have therefore studied the influence of the EBL doping on emission power and lifetime of 310 nm LEDs. LEDs with different EBLs were realized by different temporal Cp_2Mg flow profiles during growth. Fig. 1 shows the measured emission power as well as the simulated internal quantum efficiency (IQE) of these LEDs. The emission power increases from doping profile 1 to 3 by a factor of around 2.2, with profile 1 corresponding to the lowest and profile 3 to the highest

Cp_2Mg flow during EBL growth. This effect can be attributed to an improved carrier injection and electron confinement, which is in good agreement with our simulations.

The aging of UVB LEDs with three different Cp_2Mg doping profiles during EBL growth is shown in Fig. 2. Two degradation modes can be observed for all LEDs. Mode 1 takes place within the first 20 h and is marked by a fast increase or decrease of the emission power, which saturates subsequently. In contrast, mode 2 is distinguished by a slow reduction of the emission power for operation times larger than 20 h. The results show that doping of the EBL strongly affects degradation mode 1. The LED with the lowest Cp_2Mg flow shows an increase of the emission power within the first operating hours, which can be attributed to an activation of acceptors and therefore an improved hole injection. In contrast, the samples with medium and large

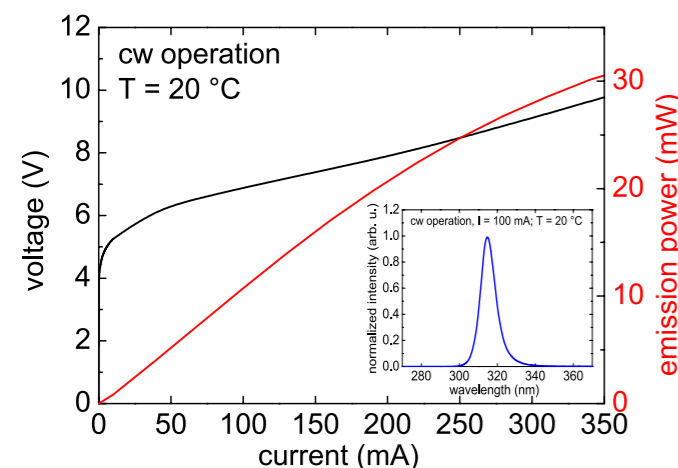


Fig. 3. Measured emission spectrum, current-voltage and output power-current characteristic of a packaged 315 nm LED at 20 °C.



Fig. 4. Flip-chip mounted 1 x 1 mm² UVB LED chip.

Cp_2Mg flow exhibit a decreasing emission power within mode 1. Non-radiative recombination effects are enhanced in this case by an increasing Mg concentration in the EBL. In summary, if both the absolute initial emission power (see inset of Fig. 2) and the operation-induced degradation are considered, the LED with the medium Cp_2Mg flow offers the highest emission power after an assumed burn-in of 100 h.

By optimizing the LED heterostructure and chip design, the LED performance has been further improved. The emission power of packaged UVB LEDs operated at 20 mA and 350 mA has been increased to more than 2.5 mW and 30 mW, respectively. In addition, the degradation could be reduced with a drop in emission power of less than 13 % over the first 100 h.

This work was partially supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) through the consortia project *Advanced UV for Life* under contracts 03ZZ0134B, 03ZZ0130A and 03ZZ0105A.

Publications

T. Kolbe, A. Knauer, J. Rass, H.-K. Cho, S. Hagedorn, S. Einfeldt, M. Kneissl, M. Weyers, "Effect of electron blocking layer doping and composition on the performance of 310 nm light emitting diodes", *Materials* 10, 1396 (2017).

H.-K. Cho, I. Ostermay, U. Zeimer, J. Enslin, T. Wernicke, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl, "Highly reflective p-contacts made of Pd-Al on deep ultraviolet light-emitting diodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 29, 2223 (2017).

H.-K. Cho, O. Krüger, A. Külberg, J. Rass, U. Zeimer, T. Kolbe, A. Knauer, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl, "Chip design for thin-film deep ultraviolet LEDs fabricated by laser lift-off of the sapphire substrate", *Semicond. Sci. Technol.* 32 12LT01 (2017).

M. Lapeyrade, S. Alamé, J. Glaab, A. Mogilatenko, R.-S. Unger, Ch. Kuhn, T. Wernicke, P. Vogt, A. Knauer, U. Zeimer, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl, "Effect of Cl_2 plasma treatment and annealing on vanadium based metal contacts to Si-doped $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ ", *J. Appl. Phys.* 122, 125701 (2017).

(In)AlGaIn-basierte Leuchtdioden (LEDs), die im ultravioletten B-Spektralbereich (UV-B) von 280 nm - 320 nm emittieren, könnten etablierte UV-Lichtquellen in verschiedenen Anwendungen ersetzen. Dazu zählen etwa die medizinische Diagnostik, die Phototherapie und die Pflanzenbeleuchtung. Allerdings bieten die derzeit besten UV-B-LEDs nur externe Quanteneffizienzen von wenigen Prozent; ihre Lebensdauern liegen typischerweise bei einigen 1.000 Stunden. Am FBH konnte die LED-Performance kontinuierlich gesteigert werden, indem die LED-Heterostruktur – vor allem die aktive Zone und die Elektronensperrschicht – optimiert und das LED-Chipdesign angepasst wurden. So wurde die Lichtleistung bei 20 mA und 350 mA auf einen Wert größer 2,5 mW bzw. größer 30 mW erhöht. Gleichzeitig konnte die Degradation der LEDs deutlich reduziert werden. Die Lichtleistung fiel dabei in den ersten 100 Stunden nur noch auf 13 % des Ausgangswertes.

Blue-violet DFB laser diodes based on GaN using 10th order laterally coupled surface gratings

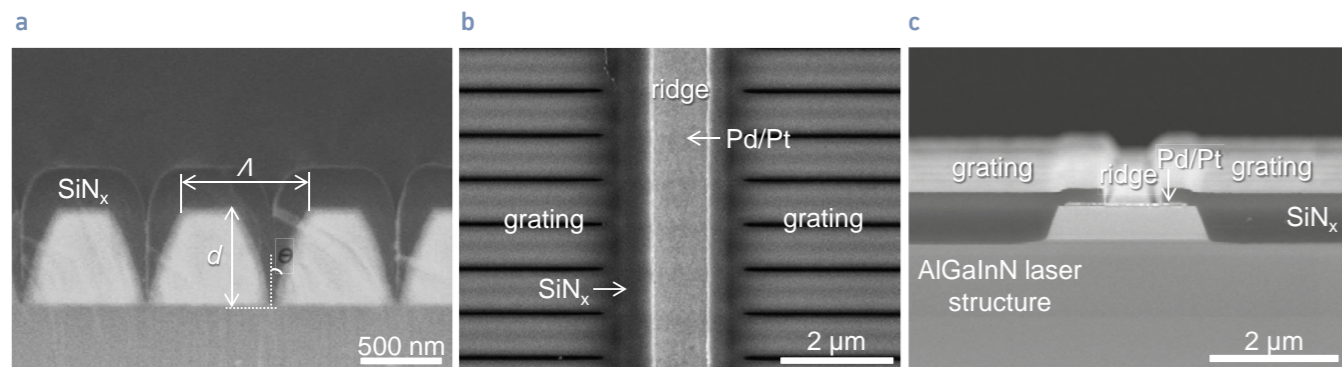


Fig. 1. SEM images (a) in cross section of the V-shaped grating perpendicular to the laser facet, (b) in top-view on the surface of the laterally coupled surface grating along the metal p-contact, and (c) in cross section of a DFB laser diode parallel to the laser facet.

Since narrow-band light sources in the blue-violet spectral region are needed for various applications in spectroscopy and for atomic clocks, distributed feedback (DFB) laser diodes based on GaN are of high interest. Up to now, there are only a few reports on such laser diodes using low-order (1st, 2nd, or 3rd order) Bragg gratings. Due to the short emission wavelength, the gratings have small dimensions and are technically difficult to realize. A sophisticated lithography is therefore needed, e.g., holographic or electron beam lithography. Moreover, epitaxially overgrown grating structures were favored in previous reports to obtain a reasonable overlap between grating and optical mode. Epitaxial overgrowth, however, requires very clean and as undamaged grating surfaces as possible to ensure a high crystalline perfection of the layers grown on top. To avoid all these difficulties we have investigated a new approach to realize blue-violet DFB laser diodes based on high-order laterally coupled surface gratings with V-shaped grooves. The chip processing technology for such gratings is rather simple as it does neither involve an elaborated lithography nor a multistep epitaxial overgrowth process. Furthermore, the laterally coupled surface grating structure makes ridge etching redundant.

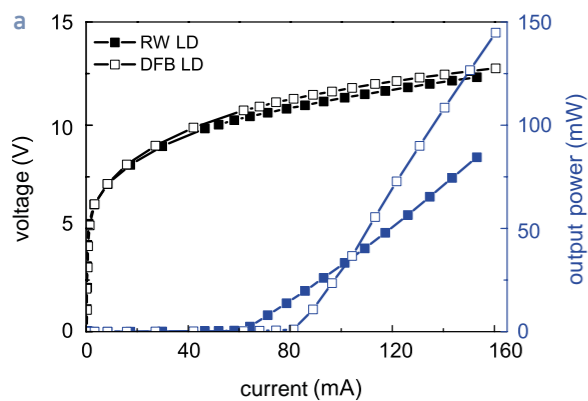


Fig. 2. (a) Light output power-current-voltage characteristics of a RW laser diode and a DFB laser diode operated in pulsed mode at 20 °C. High-resolution emission spectra of the DFB laser diode (b) and the RW laser diode (c) measured at a current 20 % above the threshold.

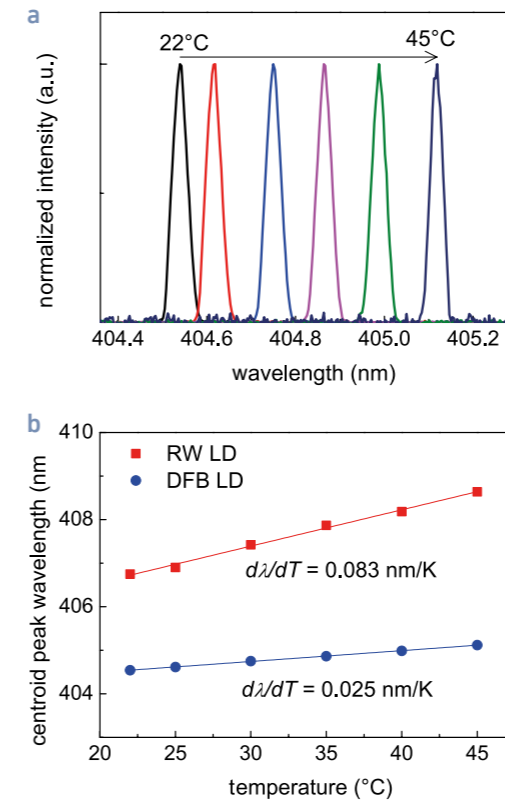
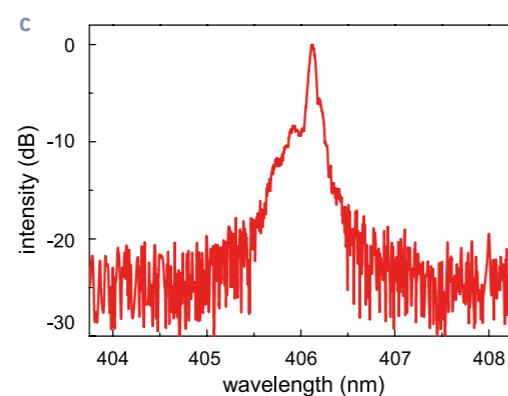
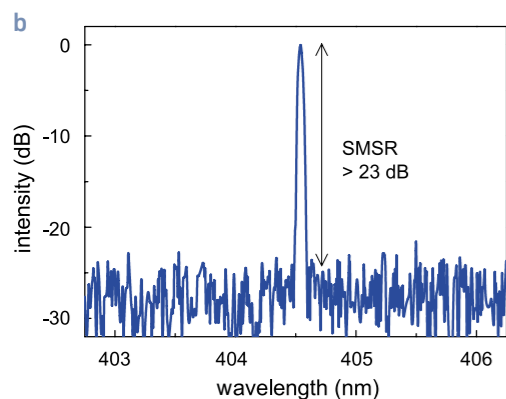


Fig. 3. (a) Emission spectra of a DFB laser diode operated at different temperatures. (b) Temperature dependence of the emission peak wavelengths of a RW laser diode and a DFB laser diode, respectively.

Recently, we have demonstrated optically pumped DFB lasers emitting at around 405 nm using 10th-order gratings etched in the surface of a GaN laser heterostructure. This concept has now been extended to DFB laser diodes. Based on simulation results, a grating of V-shaped grooves with a period of $L = 802$ nm, a depth of $d = 600 (\pm 10)$ nm (corresponding to the vicinity of the topmost quantum well), a slant angle of $\theta = 20^\circ$ and a width at the tip of around 10 nm was fabricated using i-line stepper lithography and inductively coupled plasma etching with BCl_3 gas, as shown in Fig. 1.

Based on our simulations, the expected reflectivity of this grating is around 65 %, which corresponds to a grating with rectangular grooves and a duty cycle of around 0.91. Fig. 2a reveals different threshold currents and slopes of the light output power versus current characteristics of the DFB laser diode and a reference ridge waveguide (RW) laser diode. Their front facets were coated to obtain a reflectivity of 25 % for the RW laser and <0.2 % for the DFB laser, respectively. The higher threshold and slope of the DFB laser diode can be attributed mainly to a higher mirror loss, since both threshold and slope of the DFB and RW laser diodes without facet coating (not shown here) are similar. The DFB laser diode shows a single peak emission at 404.6 nm with a full width at half maximum of 0.04 nm. The side-mode suppression ratio is greater or equal 23 dB at an output power of about 46 mW under pulsed laser operation (Fig. 2b). In contrast, the emission spectrum of the RW laser diode consists of multiple peaks independent of the injection current, as shown in Fig. 2c.

Since wavelength stability in a wide window of operation conditions is one of the key features of DFB laser diodes, temperature-dependent measurements were performed. Single longitudinal mode operation of the DFB laser diode was maintained in the temperature range between 22 °C and 45 °C at a fixed operation current of 90 mA (Fig. 3a). The shift of the lasing

wavelength of the DFB laser diode with temperature was 0.025 nm/K, which is around three times smaller than that of the RW laser diode (0.083 nm/K), as shown in Fig. 3b. The single peak emission and the weak sensitivity of the emission wavelength to temperature show that the high-order laterally coupled surface grating efficiently acts as a wavelength-selective element in the DFB laser diode, i.e., coupling of the optical mode to the grating is sufficiently strong.

In summary, DFB laser diodes in the blue-violet spectral region were successfully demonstrated by applying the concept of laterally coupled gratings, which separates the current injection region from the grating region. Moreover, by applying high-order surface gratings a greatly simplified fabrication technology could be used.

This work was supported in part by the European Fund for Regional Development of the European Union in the framework of the Berlin-Polish joint project *brilliant high power violet emitting laser diodes (Brivi)*, administrated by the Investitionsbank Berlin within the "Program to promote research, innovation and technologies" (ProFIT) under Contract 10157699.

DFB-Laserdioden mit schmalbandiger und stabiler Emission im blau-violetten Spektralbereich sind für Anwendungen in der Spektroskopie oder in Atomuhren attraktiv. Die dafür erforderlichen Bragg-Gitter lassen sich jedoch aufgrund der kurzen Emissionswellenlänge technologisch schwierig realisieren, da die Abmessungen der Gitter niedriger Ordnung entsprechend klein sein müssen. Als Alternative wurden am FBH DFB-Laserdioden auf der Basis von GaN mit lateral gekoppelten Oberflächen-Bragg-Gittern 10. Ordnung entwickelt, die aus V-förmigen Furchen bestehen. Die Chipprozess-technologie für solche Laser ist vergleichsweise einfach, da sie weder Elektronenstrahl-lithographie noch einen mehrstufigen epitaktischen Wachstumsprozess erfordern. Im Pulsbetrieb zeigen die DFB-Laserdioden eine Einzelpeakemission bei 404,6 nm mit einer Halbwertsbreite von 0,04 nm und einem Seitenmoden-Unterdrückungsverhältnis von > 23 dB bei einer Ausgangsleistung von etwa 46 mW.

Publications

J.H. Kang, H. Wenzel, V. Hoffmann, E. Freier, R.-S. Unger, S. Einfeldt, T. Wernicke, M. Kneissl, "DFB laser diodes based on GaN using 10th-order laterally coupled surface gratings", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 30, no. 3, pp.231-234 (2018).

J.H. Kang, M. Martens, H. Wenzel, V. Hoffmann, W. John, S. Einfeldt, T. Wernicke, M. Kneissl, "Optically pumped DFB lasers based on GaN using 10th-order laterally coupled surface gratings", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 29, no. 1, pp.138-141 (2017).

For further information:



<https://www.fbh-berlin.com/research/photronics>

III-V Electronics III/V-Elektronik

III/V-Elektronik

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. 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) und zur Erhöhung der Frequenzagilität (BST-Varaktoren).
- **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 Indium-Phosphid (InP) Heterobipolartransistoren (HBTs), derzeit bis zum 250 GHz-Band. Dabei kommt ein Transfer-Substrat-Prozess zur Anwendung, der auch eine InP-auf-BiCMOS-Heterointegration auf Waferebene beinhaltet. Damit können kompakte integrierte Frontend-Module für Radar-, Sensor- und Kommunikationssysteme realisiert werden.
- **Nutzung von plasmonischen Effekten für die Terahertz-Detektion** – diese Phänomene versprechen eine Einsatzmöglichkeit 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 erfordern diese Forschungsarbeiten die entsprechende Expertise bei Simulation, Modellierung, Schaltungsdesign und Charakterisierung.

III-V Electronics

The overall target of FBH's research activities in the field of III-V electronics is to push the limits of electronic devices in terms of efficient power generation at high frequencies, high voltages, and short switching times. The frequency spectrum ranges from fast power electronics through the mobile communication bands in the lower GHz range to sub-millimeter waves. 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) and enhancing frequency agility (BST varactors).
- **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 250 GHz band so far, using indium phosphide (InP) bipolar transistors (HBTs). A transferred-substrate process is applied including a wafer-scale InP-on-BiCMOS hetero-integration option. With these circuits, compact integrated frontend-modules for radar, sensor and communication systems can be realized.
- **Using plasmonic effects for THz detection** – these phenomena promise 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 that are integrated with FBH laser diodes to realize pulse laser sources, e.g., for LiDAR applications.
- **Investigating transistors based on new wide-bandgap materials such as AlN and Ga₂O₃** – for power electronics as well as microwave frequencies.

Besides the III-V semiconductor technologies, these research activities require the corresponding advanced simulation, modelling, circuit design, and measurement expertise.

Digital sequential PA for flexible efficiency tuning over a wide power back-off range

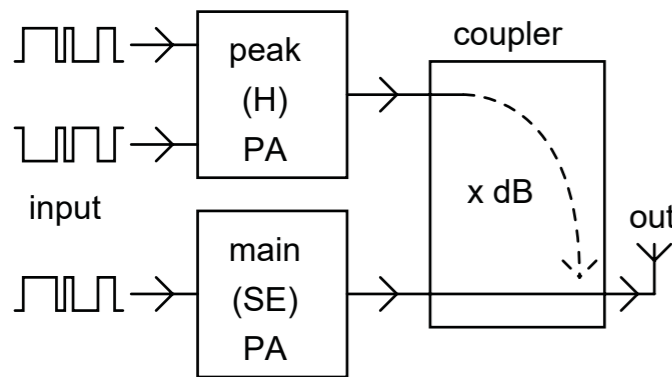


Fig. 1. Block diagram of realized digital sequential PA (DSPA) module.

Today's and future wireless mobile communication infrastructure requires compact, flexible and highly efficient microwave power amplifiers (PA) in the transmitter chain. This results from the exponentially increasing demand for high data throughput (> 10 Gbps). Thus, wide- and multi-band as well as multi-standard features are required, driving the evolution of mobile networks towards 5G to be launched in 2020. To satisfy these needs, spectrally efficient modulation schemes with broadband signals having high peak-to-average power ratios (PAPR) > 10 dB are a must. However, 3G/4G standard signals like WCDMA (PAPR ≈ 6...8 dB) still need to be supported, ideally by the same PA. At the same time, a denser spatial distribution of base stations and MIMO systems will be introduced, which leads to lower output power (P_{out}) but higher efficiency

requirements per transmitter branch. Therefore, microwave PAs as the most power-hungry part in a base station need to be highly energy-efficient over a wide dynamic range of P_{out} , typically 6...12 dB or even more, while maintaining a small form factor and a large bandwidth.

Various promising solutions applying load and supply modulation like Doherty have been proposed in the last years to address this problem. Another interesting approach to optimize the power added efficiency (PAE) in the high power back-off (PBO) region is the sequential PA (SPA). It uses two independently designed analog amplifiers combined in power by a coupler at the output. As the coupler isolates the two output PA branches no load modulation occurs. All these solutions apply analog PA architectures limited in bandwidth and compactness, which is a problem for 5G MIMO systems. Moreover, the base stations are mostly realized as digital systems except for the RF PA. Consequently, a complete digital solution is highly desirable. In 2017, for the first time the combination of digital microwave amplifiers and the SPA concept – a digital sequential PA (DSPA) module (see Fig. 1) aiming to maximize PBO efficiency over a wide range of output power – has been realized in FBH's Digital PA Lab (setup see Fig. 2).

Two digital PAs are fed with a digital input signal, each having 900 MHz signal frequency encoded. The PAs (peak/main) amplify the bit sequences in amplitude. At the output of each amplifier band-pass filters restore the wanted signals. Then, the output signals are combined by the coupler. To have more degrees of freedom in tuning the efficiency peaks over PBO, a digital H-bridge configuration (HPA in Fig. 1) is used as peak amplifier while the main PA is a single-ended one (SE PA in Fig. 1). Driving the H-bridge in digital Doherty operation generates an additional efficiency peak compared to common SPAs. The central part of both PAs is a

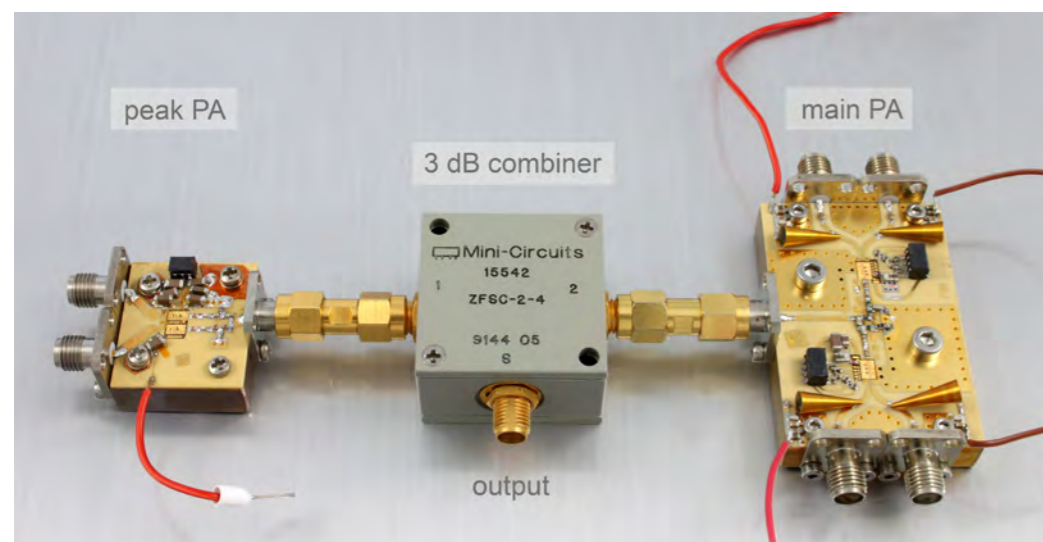


Fig. 2. Photograph of realized DSPA setup: peak PA (left), 3 dB combiner (center) and main PA (right).

compact 4-stage GaN-based digital voltage-mode class-D/S MMIC which amplifies the input bit sequences in amplitude. The PA MMIC was fabricated using FBH's 0.25 μm GaN-HEMT process line.

All measurements were carried out with PWM-like input signal having 900 MHz signal frequency encoded. While the final-stage drain supply voltage for the H-bridge is varied between 10...40 V, the drain supply voltage (V_{DD}) of the main PA is kept constantly at 10 V to generate an efficiency peak at comparatively high PBO. First, digital Doherty operation is applied to the H-bridge (step 1: both branches ON, step 2: 1st branch switched off, 2nd branch in operation, step 3: both branches OFF). After the H-bridge is completely switched off, only the main PA contributes to P_{out} and thus efficiency. Fig. 3 shows the measurement results. One

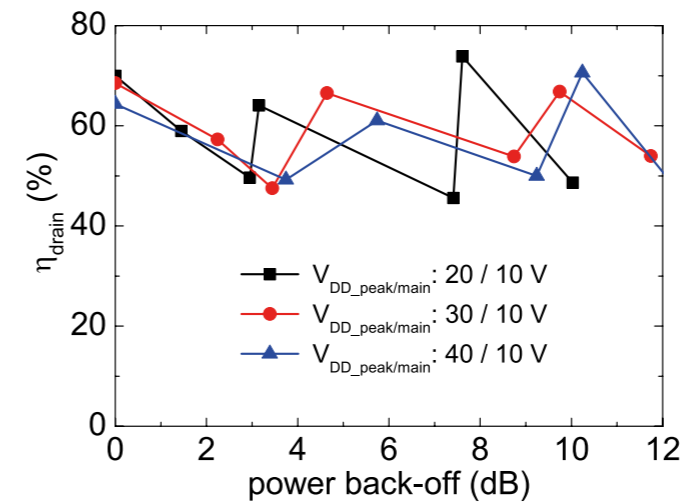


Fig. 3. Measured final-stage drain efficiency (η_{drain}) of proposed digital sequential PA line-up vs. power back-off (0...12 dB) at 900 MHz signal frequency; $V_{DD_peak} = 20...40$ V; $V_{DD_main} = \text{const.} = 10$ V.

clearly recognizes in each of the three characteristics three efficiency peaks over the whole PBO range. Depending on the V_{DD} of the peak PA (V_{DD_peak}) and thus the output power ratio between peak and main PA, the efficiency maxima are distributed differently over the PBO range. Starting with efficiencies between 64 % and 70 % for full-scale input, the second peaks (61 %...66 %), which arise due to digital Doherty operation, appear at 3.2 dB (20 V_{DD_peak}), 4.7 dB (30 V_{DD_peak}) and 5.8 dB (40 V_{DD_peak}), respectively. If the H-bridge is fully turned off, the third efficiency peak is generated. An efficiency of 74 % (20 V), 67 % (30 V) and 71 % (40 V) is achieved at 7.6 dB, 9.6 dB and 10.3 dB PBO, respectively. To set the back-off values in relation to P_{out} , the maximum output powers (0 dB PBO in Fig. 3) of the DSPA line-up are given in the following for the three values of V_{DD_peak} : 20 V: 32.8 dBm, 30 V: 35.6 dBm, 40 V: 37.7 dBm. The presented results demonstrate that the digital sequential PA setup offers a big potential for providing high efficiency over a wide back-off range, suitable for future mobile communication networks.

Mit den stetig steigenden Datenvolumina wachsen auch die Anforderungen an die mobilen Netzwerke der Zukunft. Deren Weiterentwicklung in Richtung 5G führt zu einer stärkeren Verteilung von Basisstationen. Auf Senderseite sind daher kompakte, flexible Mikrowellen-Leistungsverstärker (LV) nötig, die hoch effizient auch weit unterhalb der Vollausssteuerung arbeiten. 2017 hat das FBH weltweit erstmalig einen digitalen sequentiellen LV (DSPA) für 900 MHz entwickelt, der auf dem 0,25 μm GaN-Prozess des Instituts basiert. Der DSPA erreicht flexibel eine sehr hohe Effizienz bis zu 12 dB unterhalb der Vollausssteuerung; die maximale Ausgangsleistung des DSPA liegt bei 5,9 W. Das Design nutzt zwei digitale LV mit unterschiedlicher Ausgangsleistung, die auf einen 3 dB Koppler arbeiten und so verschiedene Effizienzmaxima über einen weiten Leistungsbereich erzeugen. In Abhängigkeit von den Versorgungsspannungen der beiden LV werden Effizienzmaxima bis zu 71 % von 0 dB bis 10,3 dB unterhalb der Vollausssteuerung erreicht. Das kompakte System lässt sich einfach auf verschiedene Kommunikationsstandards (GSM, UMTS, LTE etc.) anpassen und ist somit ideal für zukünftige Mehrkanalsysteme (MIMO) im 5G geeignet.

Publication

A. Wentzel, W. Heinrich, "Digital Sequential PA for Flexible Efficiency Tuning Over Wide Power Back-Off Range", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Philadelphia, USA, pp. 1226-1229 (2018).

Boosting efficiency – envelope tracking for space applications

In its RF Power Lab, FBH conducts research on novel concepts aiming to increase the efficiency in wideband modulated power amplifier systems. Such systems are required for modern communication solutions using spectrally efficient signals with high peak-to-average power ratio (PAPR). Within the radio frequency (RF) transmitter chain of a communication system, about 50 % to 90 % of the overall power is consumed by the RF power amplifier (RF PA). Energy-efficient operation is therefore very important but challenging at the same time, because the RF PA efficiency decreases with reduced output power, i.e., in the power back-off.

One approach to increase the RF PA efficiency in the power back-off is the envelope tracking (ET) technique, where the RF PA supply voltage is modulated according to the instantaneous signal power. When it comes to space applications, energy-efficient operation is not only desired to reduce the power consumption of the RF transmitter chain, but also to account for the hindered heat removal on board a spacecraft.

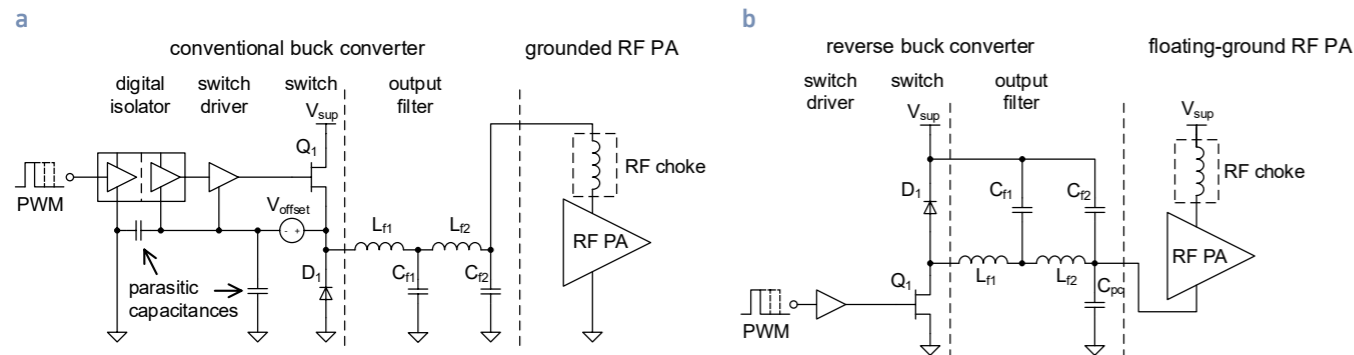


Fig. 1. Principle schematics of ET systems using (a) a conventional buck converter for the EA and a grounded RF PA (left) vs. (b) a reverse buck converter with a floating-ground RF PA (right).

The main challenge of all ET designs is the envelope amplifier (EA), which has to provide the RF PA with the modulated supply voltage and large currents. It can be realized by a DC-DC power converter in buck-converter topology. For wideband signals, fast DC-DC converters based on RF power GaN technology are necessary. They require a high-side driver, often implemented using a digitally isolated switch driver, as shown in Fig. 1 (a). A novel EA concept patented by the European Space Agency (ESA) uses a buck converter in a reverse topology, where a simplified low-side switch driver is used that switches towards ground. This is expected to improve the speed of the driver and to reduce its delay, which is critical for closed-loop operation. In contrast

to conventional buck converters, the output voltage of the reverse topology shown in Fig. 1 (b) is referenced to the supply voltage rather than the system ground. This requires an RF PA being supply-modulated from its source terminal, which acts as a floating low frequency (LF) ground while the RF ground remains system ground.

In the frame of the two-year ESA-NPI project *Improved Envelope Tracking Systems Based on VHF Switching Converter and RF Amplifier*, terminated in December 2017, the FBH developed an ET system which demonstrates the applicability of ET to space applications. Here, the first-ever shown ET system combining the ESA-patented reverse buck-converter topology for the EA with the required floating-ground RF PA [1] was successfully implemented.

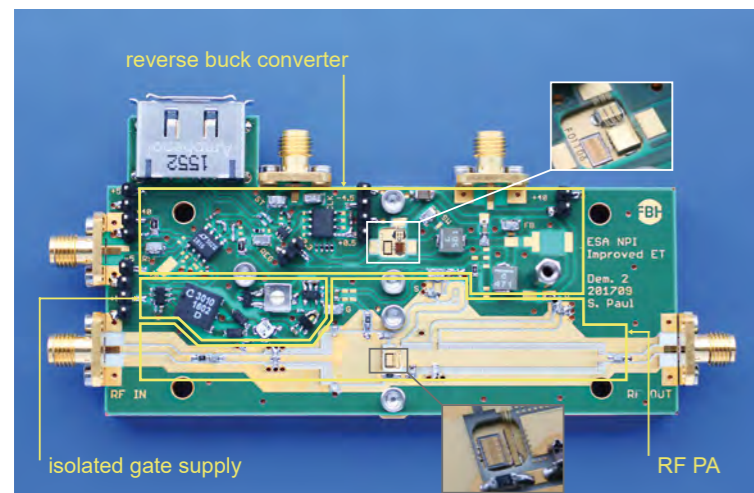


Fig. 2. Photograph of the implemented ET system containing the reverse buck converter and the floating-ground RF PA with its isolated gate supply.

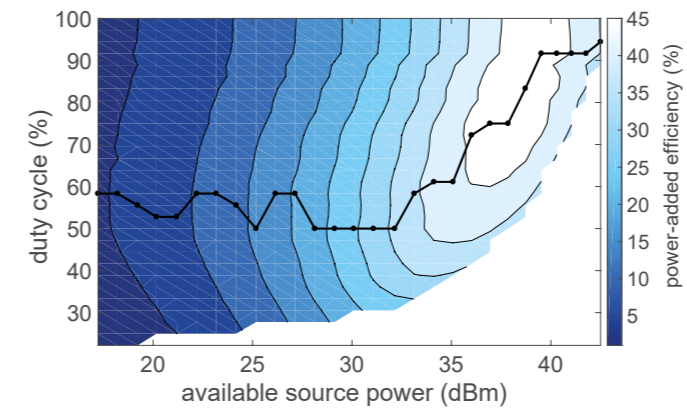


Fig. 3. ET system power-added efficiency vs. RF available source power and buck converter duty cycle, with a black line marking the shaping function for maximum PAE.

The most challenging part of this ET system is the RF PA operating with a floating LF ground. The required LF-RF separation is realized by a single-layer capacitor with suitable series resonant frequency, providing a good RF short. This capacitor is bonded as close as possible to the source of the RF transistor chip to minimize parasitics.

The developed ET system is based on FBH's 16 mm gate-width RF power GaN technology for the RF PA transistor and the EA switching transistor. A photograph of the ET system is shown in Fig. 2, including the bonded transistor chips in the insets. The ET system performance is comparable to conventional ET systems. It is operating at 1620 MHz and 40 V supply. The floating-ground RF PA accommodates signals with up to 40 MHz envelope bandwidth. The reverse buck converter switches at 45 MHz and shows an overall efficiency of more than 80 % for duty cycles above 40 %, peaking at 97 % overall

efficiency at 70 W output power over an 18 Ω load resistance. In static operation, the ET system delivers up to 58 W saturated RF output power and reaches a maximum overall ET system power-added efficiency (PAE) of 48.4 %, as can be seen in Fig. 3, where the black line marks the PAE-optimized shaping function, i.e., the look-up table of wanted power drive and supply voltage combinations, which lead to maximum system PAE. These results were obtained using a specially developed pulsed RF measurement setup presented in [2]. For an 8 MHz OFDM-modulated signal with 8.6 dB PAPR and 34 dBm average available source power and the PAE-optimized shaping function, the ET system shows 37.6 % overall PAE and an average output power of 13.5 W.

Envelope Tracking (ET) hat sich bewährt wenn es darum geht, die Effizienz von Hochfrequenz (HF)-Leistungsverstärkern im Bereich terrestrischer Kommunikationssysteme zu verbessern. Da auch für die Satellitenkommunikation immer höhere Bandbreiten gefragt sind, rücken effizienzverbessernde Techniken wie Envelope Tracking auch hier in den Fokus. Zusätzlich motiviert ist dies durch die begrenzt verfügbare Leistung und eine verminderte Wärmeabfuhr an Bord von Satelliten. Das RF Power Lab hat ein geeignetes ET-System entwickelt, das auf einem Patent der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) aufbaut. Es enthält einen Hüllkurvenverstärker, der auf einem umgekehrten Abwärtsrichter und einem HF-Verstärker mit schwebender Niederfrequenz-Masse basiert. Beide Verstärker nutzen am FBH prozessierte GaN-Transistoren mit 16 mm Gateweite. Mit diesem System konnte erstmalig nachgewiesen werden, dass sich Envelope Tracking auch für Weltraumanwendungen eignet – die demonstrierten Ergebnisse sind vergleichbar mit denen terrestrischer Systeme.

Publications

[1] S. Paul, N. Wolff, C. Delepaut, V. Valenta, W. Heinrich, O. Bengtsson, "A 14 W wideband supply-modulated system with reverse buck converter and floating-ground RF power amplifier", IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, pp. 936-939 (2017).

[2] S. Paul, N. Wolff, C. Delepaut, V. Valenta, W. Heinrich, O. Bengtsson, "Pulsed RF characterization of envelope tracking systems for improved shaping function extraction", 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, pp. 664-667 (2017).

[3] S. Paul, N. Wolff, T. Kuremyr, C. Delepaut, V. Valenta, W. Heinrich, O. Bengtsson, "Optimization of a buck converter based envelope tracking system for space applications", ESA Workshop on Microwave Technology and Techniques, Noordwijk (2017).

[4] O. Bengtsson, N. Wolff, S. Paul, T. Kuremyr, M. Krellmann, C. Delepaut, N. Ayllon, W. Heinrich, "GaN in fast DC/DC converters for envelope tracking applications in space", ESA 8th Wide Band-gap Semiconductor and Components Workshop, Harwell (2016).

Progress in InP HBT device technology and circuit fabrication

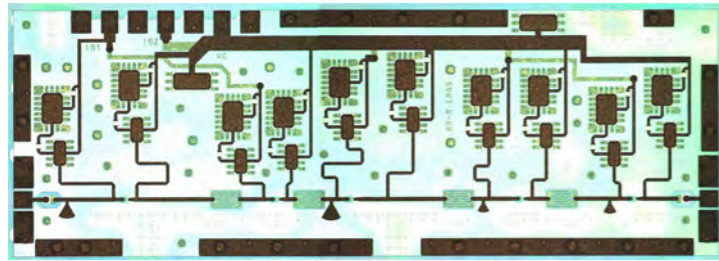


Fig. 1a. Photograph of the five-stage InP low noise amplifier, sized $2530 \times 900 \times 127 \mu\text{m}^3$, $P_{\text{DC}} = 100 \text{ mW}$.

Terahertz (THz) technology benefits from the tremendous developments in high-speed microelectronics with major application fields such as medical technology, non-destructive materials testing, radar, security, and space. The broad spectrum of FBH activities in this field includes MMIC chip design and fabrication, integrated THz detector design, integrated THz antennas, and THz device and circuit characterization. In recent years, FBH has expanded the frequency range beyond 300 GHz and its MMIC portfolio based on the compound semiconductor

InP as well as the lattice-matched materials InGaAs/InAlAs and GaAsSb for highest frequencies. Recent progress in cut-off frequencies of the InP DHBT MMIC process beyond 500 GHz has enabled MMICs with operational frequencies exceeding 300 GHz (further details see on p. 124 Advancing the high-frequency performance of FBH's InP MMIC process – development of epitaxial structure and device scaling).

FBH has also developed full chips sets for radar and imaging systems [1] as well as for high-speed communication systems. MMIC chip sets are well suited for fiber-based data transfer and wireless networks. These sets comprise broadband transimpedance amplifiers (TIA), travelling-wave amplifiers and mixers (TWA, TWM), power amplifiers as well as up and down-converters [3], low-noise amplifiers, and voltage-controlled oscillators with low phase-noise. This progress has been accompanied by the according modelling activities, aiming at scalable accurate models using novel extraction techniques [2]. In addition, assembling MMIC chips into modules has been supported by novel packaging and interconnection technologies [5, 6]. The InP HBT technology platform can be employed with various substrates using heterogeneous integration. FBH and the Leibniz institute IHP have continued to develop SciFab, a heterointegrated InP HBT/SiGe BiCMOS platform [3, 4]. Device stability and reliability tests are ongoing with devices operating for many hundreds of hours at elevated temperatures of 100 °C and 150 °C, respectively.

Exemplary individual chip set components are shown in Figs. 1 and 2. Fig. 1 illustrates a low-noise amplifiers (LNA) using the 0.8 μm InP DHBT technology, showing small-signal, noise, and large-signal properties versus frequency. The measured small-signal gain is higher than 25 dB with an associated noise figure below 9 dB from 75 to 110 GHz. Fig. 2 shows an active up-converter realized as heterointegrated module using the InP-on-BiCMOS SciFab technology. The device consists of a fundamental voltage-controlled oscillator (VCO) in 0.25 μm BiCMOS

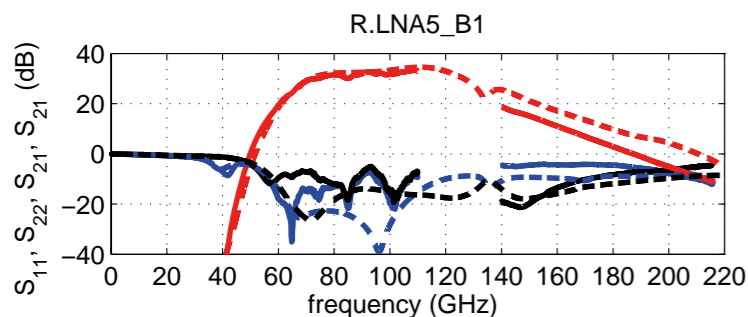


Fig. 1b. Scattering parameters, noise figure values and stability factors from 3-D EM simulation and on-wafer measurement of the InP LNA together with measured output power vs. input power levels at 90 GHz.

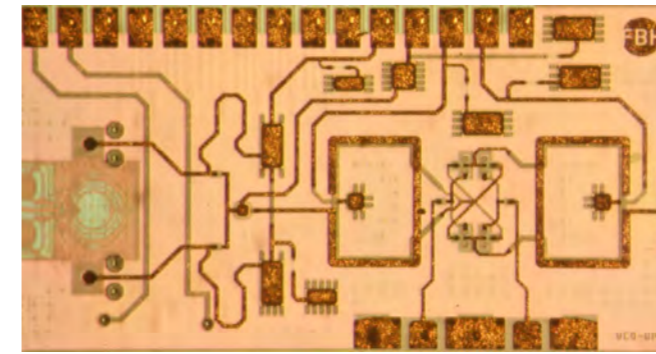
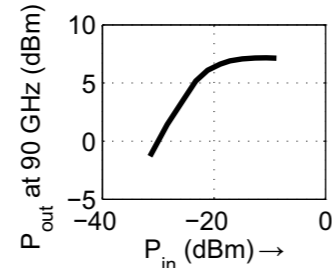
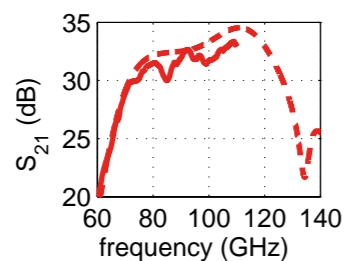
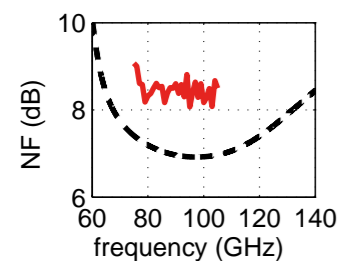


Fig. 2a. Chip photo of the entire heterointegrated up-converter module.

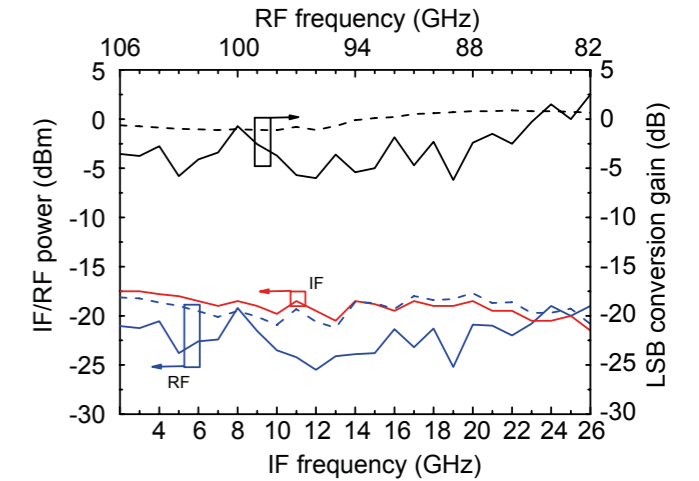


Fig. 2b. Measured (solid) and simulated (dash) IF, RF in/output power and LSB conversion gain of the heterointegrated up-converter module as a function of IF frequency. (BiCMOS VCO (LO): 0 dBm output power at 54 GHz).

Publications

[1] J. Moll, B. Hils, A. Shrestha, A. Ehlert, V. Krozer, K. Thurn, M. Vossiek, M. Hrobak, M. Hossain, W. Heinrich, M. Resch, J. Bosse, "Panel design of a MIMO imaging radar at W-band for space applications", EuMW European Microwave Conference, Nuremberg, Proc. 14th European Radar Conf. (EuRAD 2017), Nuremberg, Germany, pp. 126-129 (2017).

[2] T. K. Johansen, N. Weimann, R. Doerner, M. Hossain, V. Krozer, W. Heinrich, "EM simulation assisted parameter extraction for the modeling of transferred-substrate InP HBTs", Proc. 12th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC 2017), Nuremberg, Germany, pp. 240-243 (2017).

[3] M. Hossain, C. Meliani, M. I. Schukfeh, N. Weimann, M. Lisker, V. Krozer, W. Heinrich, "An active balanced up-converter module in InP-on-BiCMOS technology", IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, pp. 953-956 (2017).

[4] N. Weimann, M. Hossain, V. Krozer, W. Heinrich, M. Lisker, A. Mai, B. Tillack, "Tight focus toward the future: tight material combination for millimeter-wave RF power applications: InP HBT SiGe BiCMOS heterogeneous wafer-level integration", IEEE Microwave Magazine, vol. 18, no. 2, pp. 74-82 (2017).

[5] N. Weimann, S. Monayakul, S. Sinha, F.-J. Schmückle, M. Hrobak, D. Stoppel, W. John, O. Krüger, R. Doerner, B. Janke, V. Krozer, W. Heinrich, "Manufacturable low-cost flip-chip mounting technology for 300-500-GHz assemblies", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 7, no. 4, pp. 494-501 (2017).

[6] S. Sinha, R. Doerner, F.-J. Schmückle, S. Monayakul, M. Hrobak, N. G. Weimann, V. Krozer, W. Heinrich, "Flip-chip approach for 500 GHz broadband interconnects", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 4, pp. 1215-1225 (2017).

technology and a frequency multiplier followed by double balanced Gilbert mixer cell in 0.8 μm transferred substrate InP-HBT technology, which is integrated on top of the BiCMOS MMIC. The fundamental VCO operates at 54 GHz. The module achieves a single-sideband power up-conversion gain of 2.5 dB and -3.5 dB at 82 GHz and 106 GHz, respectively. It exhibits > 25 GHz IF bandwidth. Finally, a series of travelling-wave amplifier circuits were realized with DC - 130 GHz bandwidth and an output power $P_{1\text{dB}}$ of 10.5 dBm with 8 % PAE. Another TWA at higher frequencies was successfully tested providing 40 - 190 GHz amplifier bandwidth with 10 dBm output power at 160 GHz and 12 % PAE with an associated noise figure of 8 dB. Finally, a transimpedance amplifier was realized offering a bandwidth of DC - 110 GHz and 41 dBQ transimpedance.

This work was supported in part by the Leibniz Association within the Leibniz Competition projects THz InP HBT, by the German Aerospace within project *MIMIRAWE*, and the EU H2020 project *Ultrawave*.

Die Terahertz (THz)-Technologie gewinnt an Bedeutung bei Anwendungen in Industrie, Biomedizin sowie Sicherheits- und Weltraumtechnik. Hierfür entwickelt das FBH MMICs auf der Basis der InP-DHBT-Technologie: Schaltungen mit >300 GHz Betriebsfrequenz sowie MMICs, die dank neuer Materialien wie InGaAs/InAlAs und GaAsSb Grenzfrequenzen von über 500 GHz erzielen (siehe auch S. 124 Advancing the high-frequency performance of FBH's InP MMIC process – development of epitaxial structure and device scaling). Sie werden in Modulen für Radar- und Bildgebungssysteme sowie breitbandigen Kommunikationssystemen eingesetzt. Die Chipsätze umfassen Transimpedanzverstärker, Breitbandverstärker, Aufwärts- und Abwärtsmischer, Leistungsverstärker sowie rauscharme Verstärker und Oszillatoren mit niedrigem Phasenrauschen. Zuverlässigkeit und Stabilität der InP-DHBT-Standardtechnologie und der mit dem Leibniz-Institut IHP entwickelten heterointegrierten InP-auf-BiCMOS-Technologie (SciFab) konnten verbessert werden. Mehrere Hundert Stunden erfolgreicher Betrieb bei einer erhöhten Temperatur von 150 °C wurden nachgewiesen. Beispiele für erfolgreich charakterisierte Schaltungen: kompakte Aufwärtsmischer in SciFab-Technologie mit 2,5 dB bei 82 GHz beziehungsweise -3,5 dB Konversionsgewinn bei 102 GHz und einer ZF-Bandbreite von über 25 GHz. Hinzu kommen breitbandige Verstärker mit Ausgangsleistungen >10 dBm bei einer Bandbreite von 40 - 190 GHz und 12 % Wirkungsgrad bei 160 GHz, sowie Transimpedanzverstärker mit 41 dBQ mit einer Bandbreite von DC -110 GHz.

Requirements in metrology calibration applications

To achieve reliable and comparable results from on-wafer measurements, calibration is a must. Among the various algorithms in use, the mTRL method is a very popular one if accurate calibration is required. This method relies on different line elements of the same type, e.g., coplanar waveguides. These lines of varying length together with special structures (short, open, and load) form a set of calibration elements, the calibration standard. One would expect that measurements carried out with a common standard will deliver the same results after calibration, independently of the location on the wafer and the measurement equipment used. Which, however, in fact is not the case.

One reason for deviations is the probe type used for the measurement. Results differ depending on the probe characteristics – usually a three-needle Ground-Signal-Ground (GSG) system – in terms of geometrical shape, needle distance (pitch), and coaxial feeding system. It would be desirable to remove for different probe systems the inherent properties of each probe type, yielding the same characteristics of the device under test (DUT). In reality, the calibrated results obtained differ because of effects that can be attributed to the probe and the environment.

Also the layout design of the calibration set is important. Fig. 1 shows an example of the same calibration set located at two different positions on the substrate. As becomes clear from Fig. 2, this variation causes deviations in the calibrated data.

All these effects can be related to the electromagnetic field and the wave behavior in the environment around the respective structure, consisting of the probe area, the line itself, the substrate and chuck regions as well as the air region above the line and the probe. Thus, a wide range of parasitic phenomena occurs. Beside the desired mode propagation along the transmission line, one can observe substrate modes, radiation from the touching point of the probe needles onto the line, and radiation along the line. Other effects originate from neighboring structures in the vicinity (dense layout of all lines on the wafer), from substrate edges close to the probe, or from other perturbing materials in the vicinity.



Fig. 1. Same calibration set arranged in two different configurations (left: Cal 1, right: Cal 2).

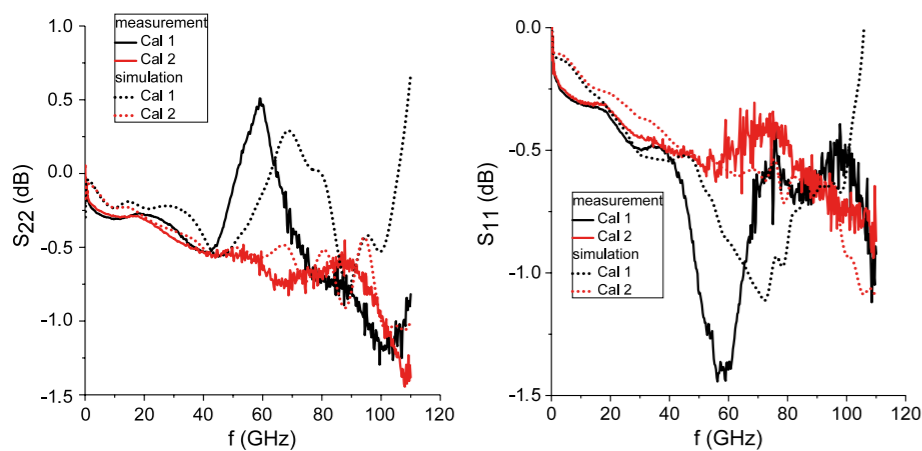


Fig. 2. Measured and simulated results of a device under test calibrated with the calibration standards Cal 1 and 2, respectively.

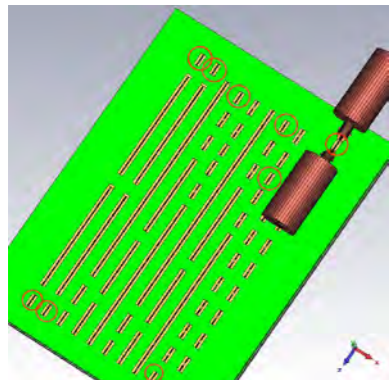


Fig. 3. Calibration set with a certain line located in different positions of the wafer (l.); simulated and measured results (r.) of lines of the same type (align 4 = thru_2a = thru_2b) show strong deviations depending on the line location.

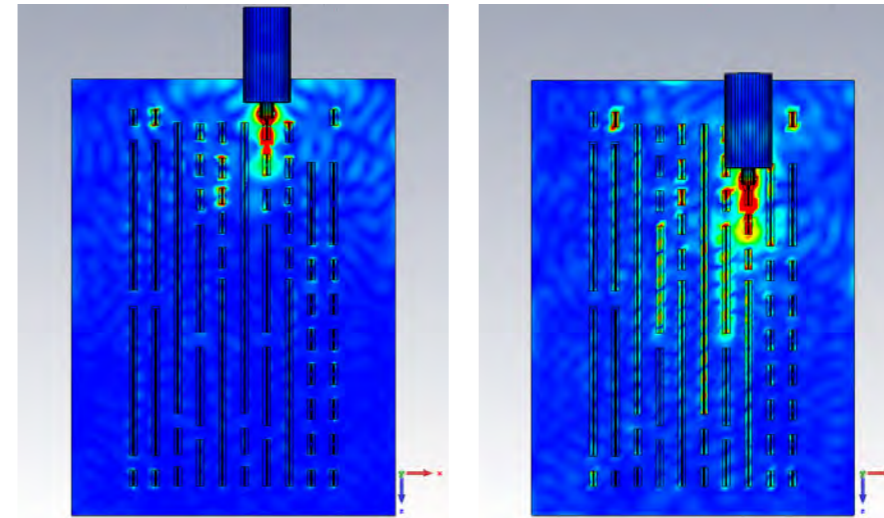
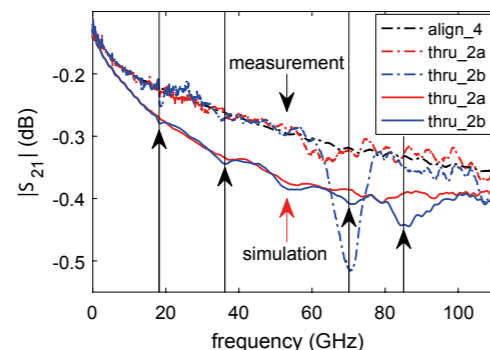


Fig. 4. Field distributions exciting a DUT at 85 GHz on two different locations on the substrate (l.: thru_2a; r.: thru_2b).

state, it is necessary to develop mandatory rules for wafer type, line type, and design as well as the measurement equipment (especially chuck and probe) and the calibration algorithm, which promise uniqueness.

The FBH part is to identify the parasitic effects which occur in typical situations. As an example, Fig. 3 shows a dedicated calibration standard with a certain line type (thru), located at different positions on the substrate. The measured results differ depending on the location of the thru line on the substrate (see Fig. 4).

The outcome of the joint work with PTB, NPL and TU Delft is a material and chuck definition which minimizes substrate modes and thus coupling with other structures. For the thin-film microstrip case, we defined layout rules that reduce coupling to neighboring elements and inappropriate measurement conditions caused by the line position. For the coplanar case, our results provided some first layout rules for the distance between the calibration elements, depending on the probe type and the substrate material. Also, the critical construction parameters for the probe were identified and modifications to reduce the parasitic effects were proposed.

Um zuverlässige Messergebnisse aus On-Wafer-Messungen zu erhalten, sind Kalibrierungen notwendig. Dafür wird ein Kalibrierset mit unterschiedlichen Leitungen benötigt, deren Eigenschaften nach erfolgreicher Kalibrierung bekannt sein sollten. Es wäre folglich zu erwarten, dass die Ergebnisse kaum voneinander abweichen dürfen – unabhängig vom jeweiligen Messplatz. Tatsächlich gibt es jedoch deutliche Abweichungen. Einen wesentlichen Einfluss haben die Prober, mit denen die Messung durchgeführt wird und die das elektrische Verhalten verändern. Die gesamte Kalibrierumgebung – Trägermaterial, Prober und Messunterlage – beeinflussen die Ergebnisse. Um künftig vergleichbare Resultate mit höchster Übereinstimmung bei allen Anwendern zu erhalten, sind sehr genaue metrologische Kalibrieranforderungen nötig. Gemeinsam mit weiteren europäischen Partnern – nationale Metrologieinstitute, Forschungseinrichtungen und Unternehmen – arbeitet das FBH daher an einer breit aufgestellten, allgemeinen Lösung für eine gleichartig definierte Kalibrierumgebung.

Publications

G.N. Phung, F.J. Schmückle, R. Doerner, W. Heinrich, T. Probst, U. Arz, "Effects Degrading Accuracy of CPW mTRL Calibration at W Band", IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS) Digest Philadelphia, USA, pp. 1296-1299 (2018).

T. Probst, S. Zinal, R. Doerner, U. Arz, "On the Importance of Calibration Standards Definitions for On-Wafer Measurements up to 110GHz", in 91st Automatic RF Techniques Group Microwave Measurement Conference (ARFTG), Digest Philadelphia, USA (2018).

F.J. Schmückle, T. Probst, U. Arz, G.N. Phung, R. Doerner, W. Heinrich, "Mutual Interference in Calibration Line Configurations", 89th Automatic RF Techniques Group Microwave Measurement Conference (ARFTG) Digest, Honolulu, USA, B-4 (2017).

G. N. Phung, F. J. Schmückle, R. Doerner, T. Fritzsche, W. Heinrich, "Impact of Parasitic Coupling on Multiline TRL Calibration", Proc. of 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, Germany, pp. 835-838 (2017).

U. Arz, S. Zinal, T. Probst, G. Hechtischer, F.J. Schmückle, W. Heinrich, "Establishing Traceability for On-Wafer S-Parameter Measurements of Membrane Technology Devices up to 110 GHz", 90th Automatic RF Techniques Group Microwave Measurement Conference (ARFTG), Digest, Boulder, USA (2017).

T. Probst, R. Doerner, M. Ohlrogge, R. Lozar, U. Arz, "110 GHz On-Wafer Measurement Comparison on Alumina Substrate", 90th Automatic RF Techniques Group Microwave Measurement Conference (ARFTG), Digest, Boulder, USA (2017).

Within the EU project EMPIR one topic (14IND02PlanarCal) is dedicated to "Microwave measurements for planar circuits and components", which addresses the problems described above. The national metrology institutes participating (PTB – Germany; NPL – England; VSL – Netherlands, METAS – Switzerland) as well as other institutes and companies (TU Delft, University of Leeds, Fraunhofer IAF, FAU Nuremberg, University of Lille, Rohde & Schwarz) attach much importance to the described problems. They are aiming to define certain, globally valid measurement routines, yielding results close to exact coincidence for a DUT investigated under any condition. At this

Normally-off AlGaIn/GaN HFETs using strain adjustment in gate trench region

The FBH has developed a new technique employing sophisticated stress management, which enables monolithic integration of enhancement and depletion mode transistors on a single GaN chip. In GaN-based heterojunction field effect transistors (HFET) the channel electron density depends on the superposition of spontaneous and piezoelectric polarization vectors in the layers forming the heterojunction. As a result, a two-dimensional electron gas (2DEG) is created whose density solely depends on the different degrees of built-in polarization in the top epitaxial layers. In the case of GaN HFET with AlGaIn/GaN heterojunction, an Al concentration of the barrier layer is selected to achieve the optimum 2DEG concentration for a specific application. For a given gate technology, this concentration determines a characteristic pinch-off voltage of the device. The total polarization charge is mainly influenced by the Al composition in the AlGaIn barrier with piezoelectric contribution of around 30 % of the total charge. This quantity can be intentionally modified by applying external mechanical stress.

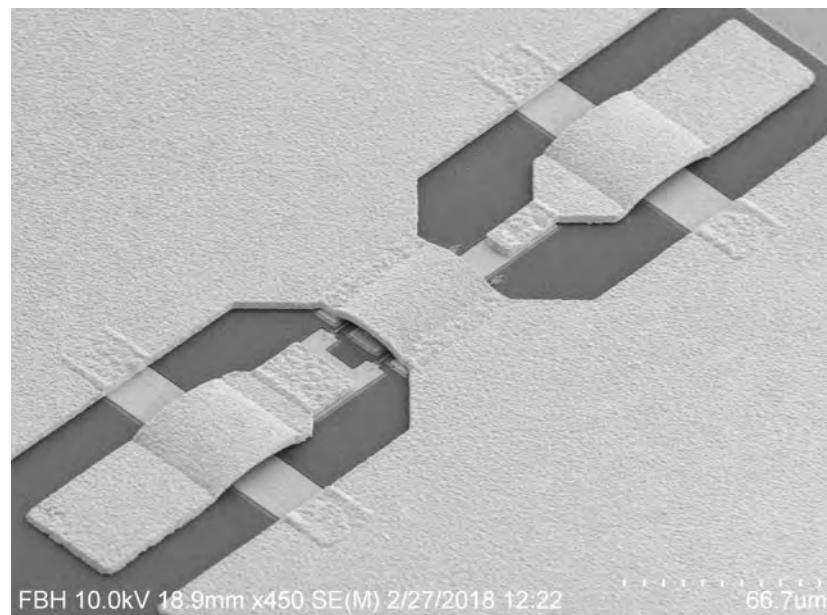


Fig. 1. SEM image of test two finger transistor designed for MMIC of coplanar layout.

In the standard fabrication process of AlGaIn/GaN HFETs (Fig. 1) the gates are encapsulated in a SiN_x passivation layer. This layer usually has a built-in mechanical stress, which can be adjusted by the deposition parameters. The mechanical stress relaxes at the edges of gate trenches formed in SiN_x , creating boundary conditions with high strain in AlGaIn layer beneath. Fig. 2 explains this particular situation. Tensile and compressive stressed SiN_x will either increase or decrease the piezoelectric contribution to a total charge at the interface. The effect is magnified in the vicinity of the gate trench sidewalls.

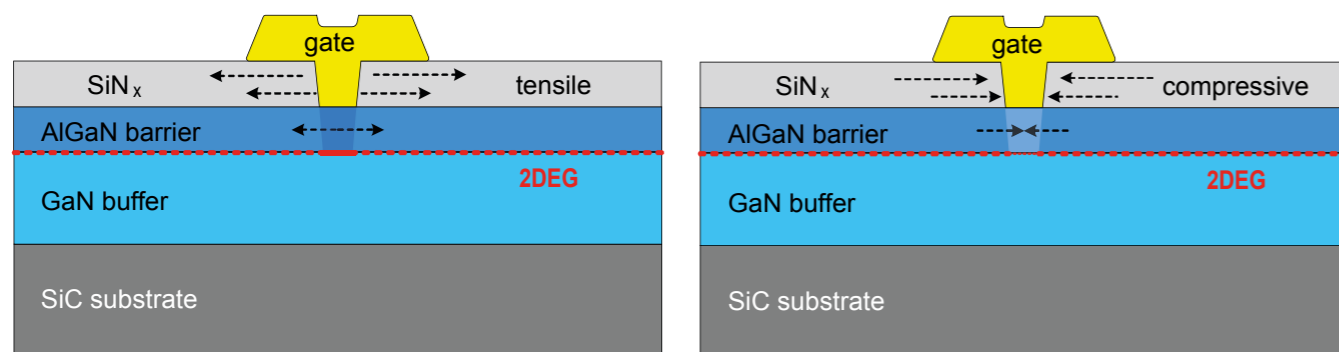


Fig. 2. Schematic cross section of AlGaIn/GaN HFET gate region with tensile (l.) and compressive (r.) SiN_x passivation layers, the corresponding strain is shown by dashed arrows.

The approach was tested by utilizing FBH's X-band MMIC technology based on 250 nm gate length and 100 nm SiN_x passivation layer thickness. The tensile version consists of SiN_x passivation with built-in tensile stress of ~ 500 MPa, whereas the compressive version had an internal stress of ~ -100 MPa.

Fig. 3. (left) compares typical transfer characteristics for the devices from this test. Those with compressive passivation layer have a positive threshold voltage (V_{th}) shift of 0.65 V. This effect is of practical interest as it shows a potential for modifying the threshold voltage of the devices by varying stress during processing. The strain-induced effect on the transistor performance further increases if at least one of the following modifications applies: reduction of gate length, decrease of AlGaIn barrier thickness, and increase of the thickness for compressive SiN_x passivation layer. These modifications were tested on the wafers processed with FBH's Ka-band MMIC technology based on transistors with 150 nm gate length. As compared to the previous test, the Al mole fraction of the AlGaIn barrier was increased from 22 % to 32 %, whereas its thickness was reduced from 22 nm to 10 nm. Additionally, the thickness of the SiN_x passivation was increased to 300 nm. Fig. 3 (right) shows that these optimized conditions are able to provide devices with a threshold voltage shift of more than 2.5 V on the same epitaxial structure. It is even possible to fully deplete electrons underneath the gate and therefore render the devices normally-off.

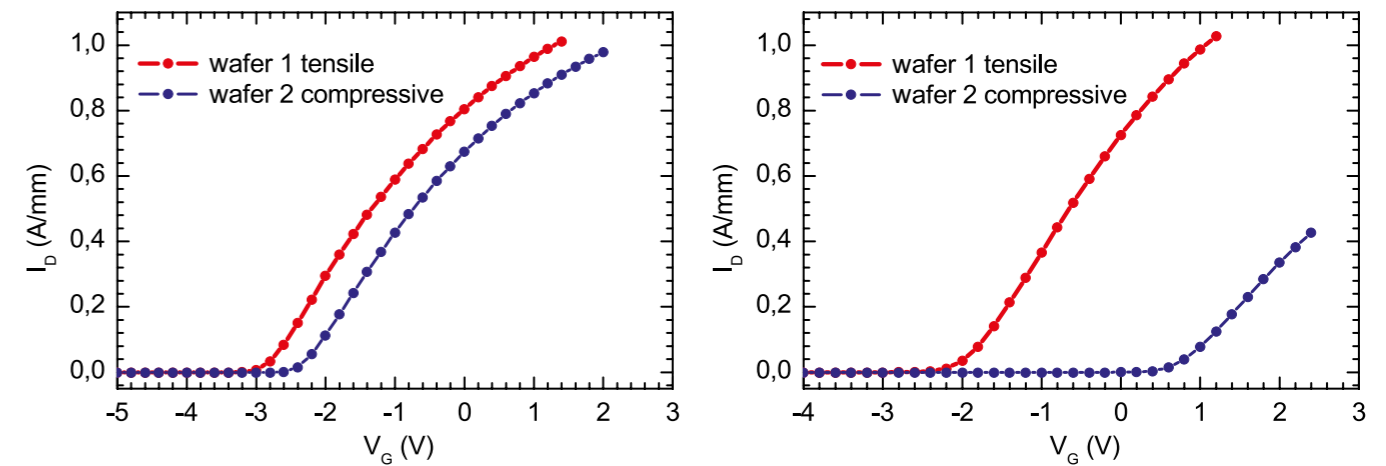


Fig. 3. Comparison of transfer characteristics of AlGaIn/GaN transistors fabricated on wafers with tensile and compressive first SiN_x passivation layer. Transistor dimensions: finger geometry is $2 \times 50 \mu\text{m}$, gate length $L_g = 250$ nm (l.), and $L_g = 150$ nm (r.).

This new technique is extremely versatile, enabling tailoring device properties for certain applications without changing the design of the epitaxial layers. Thus, it opens up novel possibilities for monolithic integration of devices with different functionalities on a single chip.

Die Dichte des 2-dimensionalen Elektronengases (2DEG) im Kanal von AlGaIn/GaN-basierten Feldeffekttransistoren hängt von der spontanen Polarisation in den Schichten und von deren mechanischen Verspannungszuständen ab (piezoelektrische Polarisation). Für eine bestimmte Gate-Technologie definiert die 2DEG-Konzentration die charakteristische Schwellenspannung (V_{th}) des Transistors. Der piezoelektrische Anteil der Gesamtpolarisation kann durch eine zusätzlich eingefügte mechanische Verspannung gezielt verändert werden – etwa durch SiN_x -Passivierungsschichten mit eingebautem mechanischem Stress, der sich im Bereich des geöffneten Gate-Trenches auf den Halbleiter überträgt (Abb. 2). Dadurch verschiebt sich die Schwellenspannung. Dieses Verhalten wurde systematisch an Transistoren für 250 nm und 150 nm GaN-MMICs getestet. Bauelemente mit kompressiver SiN_x -Schicht zeigten eine positive V_{th} -Verschiebung, bei tensilen Schichten war die Verschiebung entgegengesetzt gerichtet. Der Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je kürzer die Gates sind sodass bei 150 nm Gates selbstsperrende Transistoren erreicht wurden. Das ermöglicht beispielsweise eine einfache monolithische Integration von selbstsperrenden und selbstleitenden Transistoren.

Publication

K. Y. Osipov, I. Ostermayr, F. Brunner, J. Würfl, G. Tränkle, "Novel approach for E/D transistors integration in GaN HEMT technology", Int. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS ManTech), Austin, USA (2018).

Robust power-switching with lateral normally-off 600 V GaN transistors

Gallium nitride (GaN)-based transistors are ideally suited for power electronic applications. These devices allow efficient converter operation at much higher switching frequencies than those based on silicon and thus enable converters with increased power density. Besides their low area-specific on-state resistance, low switching losses are the key benefit of the lateral GaN high-voltage transistors. Their low gate charge and low output capacitance enable very fast switching transients with slopes > 100 V/ns. A 400 V switching event can take place in less than 10 ns. The dissipated energy due to simultaneous current flow and high drain bias during such an event is very low.

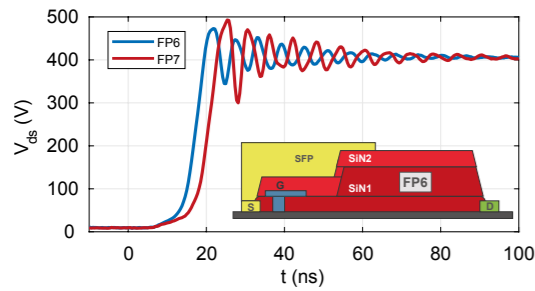


Fig. 1. 10 A/400 V switching transients of 170 mΩ GaN-transistors with two field plate versions, FP6 (blue) and FP7 (red).

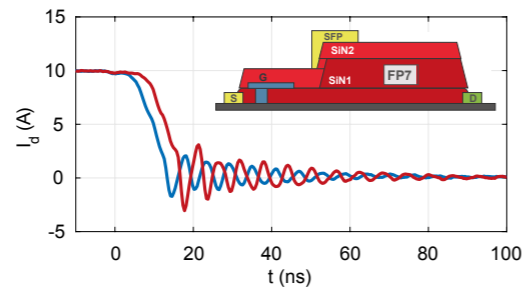


Fig. 2. Transistor degradation after continuous 200 V switching stress for design version FP1 (l.) and FP6 (r.). The transfer curves were taken every 1,000 switching events up to 10,000 times switching.

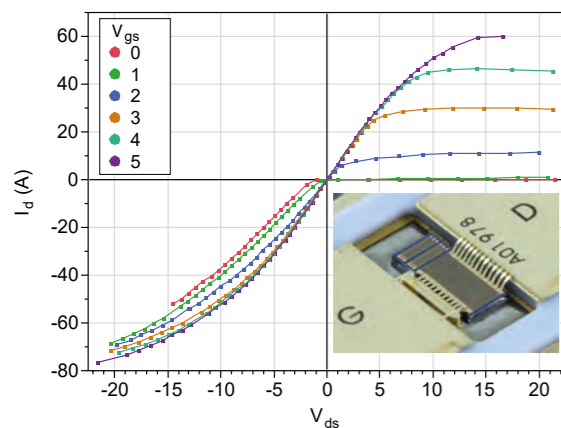
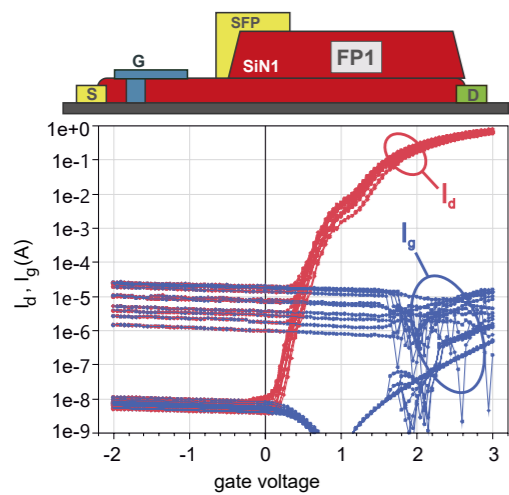


Fig. 3. Output characteristic of a normally-off 170 mΩ/600 V GaN transistor operated in the 1st and 3rd quadrant.

The extremely high switching speed, however, makes high-voltage GaN transistors prone to additional losses generated by non-ideal current and voltage transients during operation. Even small parasitic inductances and capacitances in the converter circuitry induce current and voltage overshoots when the (output) power loop or the (input) gate-driving loop is commuting. These overshoots lead to oscillations in the switching transients or even uncontrolled switching. A common way out is slowing down the switching speed artificially, i.e., by introducing gate resistors. However, high-frequency operation is required to exploit the full potential of GaN-based power conversion.

FBH recently adjusted the device technology of its lateral normally-off 600 V GaN transistors to handle the fast transients more safely. Improvements aim at keeping the associated switching losses low and making the devices sufficiently robust against transient over-voltage peaks. The fast switching times require that the full gate

charge must be loaded simultaneously to all gate fingers of the transistor structure within only 2 - 4 ns, which leads to peak gate currents of a few ampere. Hence, the metal lines of the on-chip gate signal distribution are significantly enforced such that the maximum gate bias drop over the chip is < 0.3 V, even for 400 V switching operation in 4 ns.

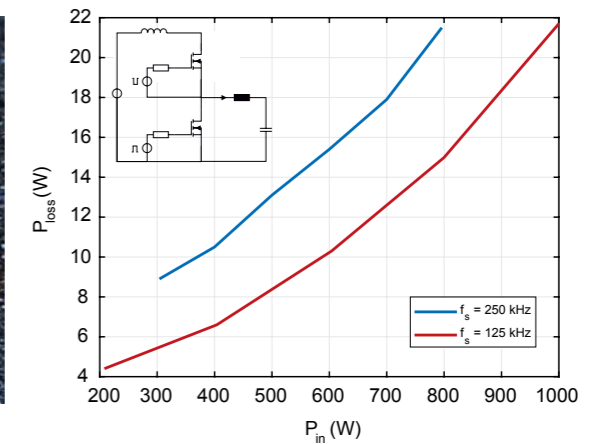
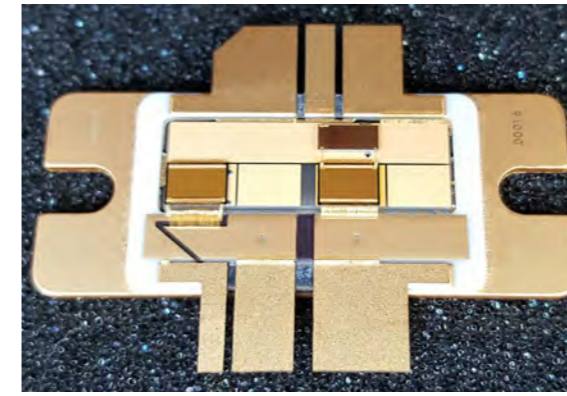


Fig. 4. Diode-less half-bridge module with two 75 mΩ/600 V GaN transistors (l.). 22 W loss was measured for 1 kW output power at 125 kHz (r.), which corresponds to 97.8 % efficiency

Further, the transistor field-plate design was changed to avoid excessive ringing during fast switching. The gate is now completely shielded from top side by a source-connected field plate (SFP), which reduces feedback from the drain-side output circuit to the gate potential (inset of Fig. 1). The ratio of input capacitance to reverse capacitance (C_{iss}/C_{rss}) is increased; reduced ringing is observed for 10 A/400 V switching transients with the new version FP6 of the 170 mΩ transistors as compared to the old version FP7 (Fig. 1).

Finally, it was found that high electric fields between the drain-side field-plate edge and the transistor channel compromise device reliability during switching operation. The off-state gate and drain leakage increased after some thousand switching events during long-term stress for the former design version FP1 (Fig. 2 left). The thickness of the associated SiN passivation layer was increased in the new design version FP6, and the transistor showed no degradation in their device characteristics after 10,000 switching events (Fig. 2 right). Finally, the 600 V devices passed long-term step-stress tests with continuous 20 kHz switching for 26 hours and up to 800 V.

A particular feature of the FBH technology for lateral normally-off GaN transistors is their robustness for (reverse) transistor operation in the third quadrant (Fig. 3). Reverse-conducting free-wheeling diodes can therefore be omitted in (converter) half-bridge modules, thus reducing the module semiconductor count to one half. A diode-free half-bridge module with two 75 mΩ/600 V transistors was built up in the frame of the common Joint Lab Power Electronics with TU Berlin (Fig. 4) and operated at 125 kHz and 250 kHz switching frequencies as buck converter. The transistors switched 6 A/300 V. At 800 W output power, an efficiency of 97.3 % was achieved for 250 kHz switching frequency, and 98.1 % efficiency was achieved for 125 kHz switching frequency. 97.8 % efficiency was achieved at 125 kHz for 1 kW output power.

Support from the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) LESII project ZuGaNG under contract No. 16ES0079 and German Research Foundation (DFG) under contract WU172/5-1 is acknowledged.

Dank ihrer hohen inhärenten Schaltgeschwindigkeit sind laterale GaN-Transistoren ideal für leistungselektronische Anwendungen geeignet. Anpassungen innerhalb des Transistorchips sind jedoch nötig, um eine hohe Schalteffizienz und Bauelementrobustheit zu erhalten. Am FBH wurde nun durch ein verbessertes Feldplattendesign der 600 V GaN-Schalttransistoren die Rückkopplung des drainseitigen Lastkreises auf das Gate verringert. Schwingungen im Strom- und Spannungstransienten, die zu Verlusten während des Schaltens führen, konnten so reduziert werden. Durch eine Verstärkung der Bauelementpassivierung konnte verhindert werden, dass das Material während des kontinuierlichen Hochspannungsschaltens degradiert. Die neue Bauelementgeneration zeigte bis zu 800 V eine hohe Schaltzuverlässigkeit. Zudem wurde im Rahmen des gemeinsamen Joint Lab Power Electronics mit der TU Berlin ein diodenloser halbbrückenbasierter 300 V Tiefsetzsteller aufgebaut, der die Rückwärtsleitfähigkeit der GaN-Transistoren nutzt. Er erreichte bei 1 kW Leistung und 125 kHz Schaltfrequenz einen Wirkungsgrad von 97.8 %.

Publications

J. Böcker, C. Kuring, O. Hilt, J. Würfl, S. Dieckerhoff, "Cross Conduction of GaN HFETs in Half-Bridge Converters", Proc. Int. Exhibition and Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe 2017), Nuremberg, Germany, pp. 1378-1385 (2017).

M. Meneghini, O. Hilt, J. Würfl, G. Meneghesso, "Technology and Reliability of Normally-Off GaN HEMTs with p-Type Gate", Energies, vol. 10, no. 2, pp. 153 (2017).

Design and gate-control of 600 V monolithically integrated normally-off bidirectional GaN-on-Si HFETs

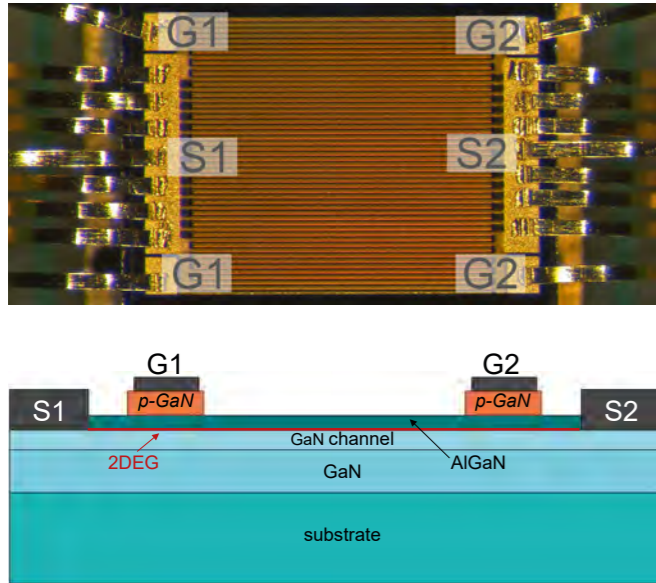


Fig. 1. Photo of a 600 V processed and packaged bidirectional 97 mm p-GaN HFETs (top) highlighting the device cross section, simplified schematic (bottom).

In contrast to many competing technologies, GaN power devices can principally operate in a reverse conduction mode. This property can be utilized to construct monolithically integrated symmetric transistors capable of bidirectional switching (bi-HFETs). As they can be realized for > 600 V blocking capability they attract considerable interest for use in novel power converter topologies like T-type and matrix converters. The key element of these topologies is a fully controlled bidirectional switch, capable of conducting currents and blocking voltages in both polarities. In comparison to conventional approaches where several discrete devices are needed to achieve bidirectional functionality, monolithically integrated GaN bi-HFETs boost efficiency of power electronic converters at device level. The realized bidirectional devices utilize the same internal drift zone for both switching directions and are therefore cutting down on-state losses by a factor of two. The resulting compact design also decreases the active area and therefore reduces switching losses as well. Based on FBH's well-established manufacturing process of 600 V normally-off switching GaN power transistors, monolithic integration of true bidirectional GaN power switches (Fig. 1) using double-gate structure was demonstrated.

The devices have an inter-digitated layout. Fig. 1 (bottom) sketches a simplified cross section of the bidirectional device, illustrating its symmetry with two independently controllable gates at both sides. In between the gates the device shares the same drift region giving rise to very efficient switching. Fig. 2 (left) demonstrates the symmetric switching of the device in both directions – a compulsory requirement for bidirectional operation. The second gate effectively controls the total drain current of the bi-HFET. If it is switched to a potential higher than the drain potential of the bi-HFET (for example $V_D + 3$ V), the whole arrangement

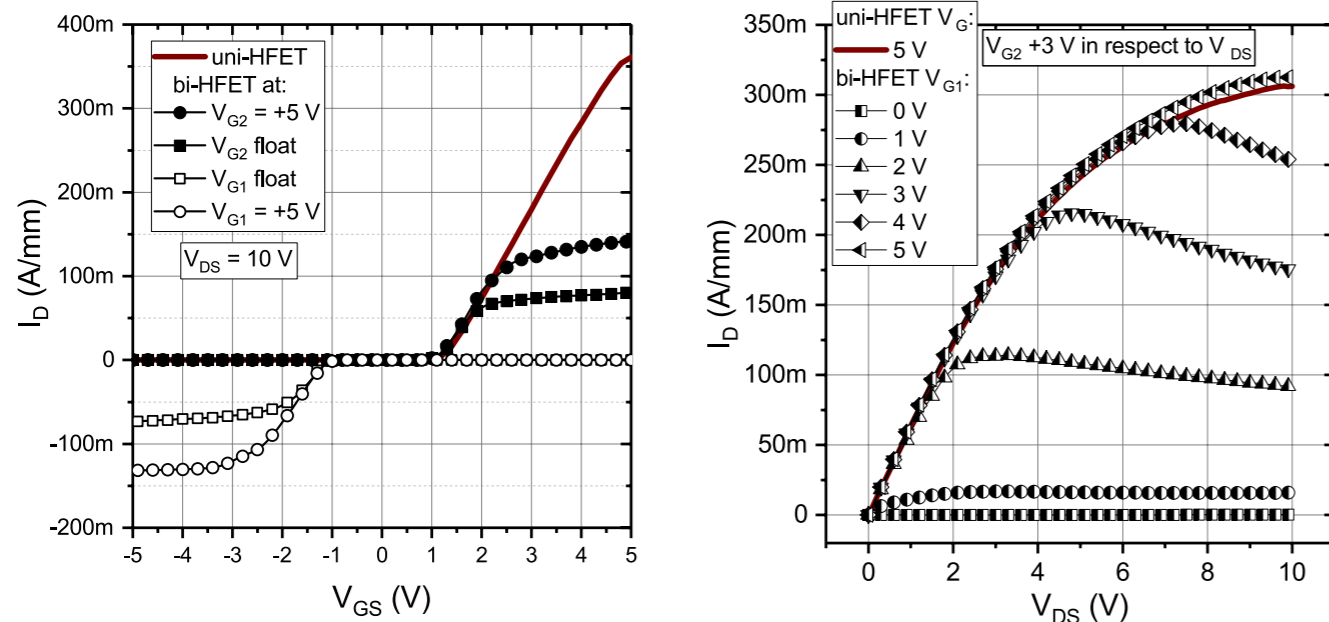


Fig. 2. IV-characteristics of the bi-FET: Transfer characteristics with different branches showing the effect of the second-gate biasing (l.), output characteristics and comparison with standard unipolar HFET having the same dimensions of the drift zone (r.).

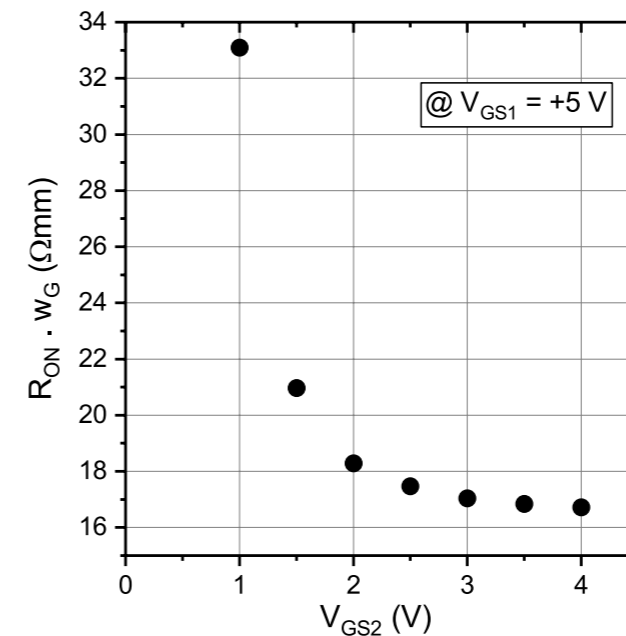


Fig. 3. Influence of V_{GS2} on normalized R_{ON} of a 97 mm monolithically integrated bidirectional GaN HEMT.

can be fully turned on and does not show any compromise in on-state resistance if compared to a unipolar GaN FET with the same dimension of the drift region see Fig. 2 (right).

The system compatibility was successfully demonstrated by fabricating different HFETs on the same wafer: 600 V bidirectional GaN HFETs with 97 mm gate width (Fig. 1) and unidirectional GaN HFETs with 92 mm gate width, showing similar current switching capabilities and blocking voltages. As the bi-HFET drift layer is placed between the two gates the required active device area per gate width is pretty much the same as for the single FETs. Consequently, the on-state resistance R_{ON} of the monolithically integrated double-gate device is in the same range as for the single-gate structure. Fig. 3 displays the impact of the bias V_{GS2} of the second gate to the normalized R_{ON} . In agreement with the gate-control scheme, a positive bias $V_{GS2} > 2$ V on the second gate with respect to drain is required to securely open the bi-HFET. When increasing V_{GS2} from 2.5 V to 4 V, R_{ON} shows an additional 4 % decrease. The extracted minimum value $R_{ON} \cdot w_G = 16.3 \Omega\text{mm}$ resulted in an absolute

on-state resistance of 168 m Ω for the bidirectional devices.

Having processed 168 m Ω /600 V bi-HFETs and unidirectional HFETs on the same technological platform makes it straight forward to integrate both structures into on-chip applications. For example, this would effortlessly allow monolithic integration of a T-type inverter, which effectively consists of two unidirectional switches and one bidirectional switch, forecasting a drastic minimization of the commutation loop. This would allow to promptly exploit the full switching speed inherent to GaN HFET technology.

This work has been supported by the German Research Foundation (DFG) under contract WU 172/5-1.

GaN-Leistungshalbleiter eignen sich aufgrund der inhärent hohen Schaltgeschwindigkeit besonders für schnelle und effiziente Leistungswandler. Monolithisch integrierte bidirektionale Schalter (bi-HFETs) auf der Basis von GaN ermöglichen neuartige Konvertertopologien wie T-Typ- und Matrixkonverter. Sie zeichnen sich durch einen voll symmetrischen Aufbau mit zwei Gates in der Driftzone aus. Beim bi-direktionalen Schalten wechseln sich Drain- und Sourcelektrode ab; weder Einschaltwiderstand noch Sperrfestigkeit werden dabei beeinträchtigt.

Am FBH wurden bi-FETs auf Basis der verfügbaren 600 V p-GaN-Gate-Normally-off-HFETs technologisch realisiert und getestet. Beide Gates steuern den Drainstrom, wobei das zweite Gate bezüglich des jeweils aktiven Drains um 3 bis 4 V positiv vorgespannt werden muss, um einen stabilen, voll eingeschalteten Zustand zu erreichen. In Stromrichtern kann das Konzept seine Vorteile voll ausspielen. Durch den kompakten Aufbau verkleinern sich Kommutierungsschleifen; parasitäre Induktivitäten und Einschaltwiderstände nehmen ab. Monolithisch integrierte bidirektionale GaN-HFETs erreichen gegenüber vergleichbaren siliziumbasierten Lösungen einen um etwa 50 % kleineren Einschaltwiderstand.

Publication

O. Hilt, R. Zhyhnytska, J. Böcker, E. Bahat-Treidel, F. Brunner, A. Knauer, S. Dieckerhoff, J. Würfl, "70 m Ω /600 V Normally-off GaN Transistors on SiC and Si Substrates", Proc. 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, Hong Kong, CN, pp. 237-240 (2015).

Gallium oxide technology for high-voltage switching devices

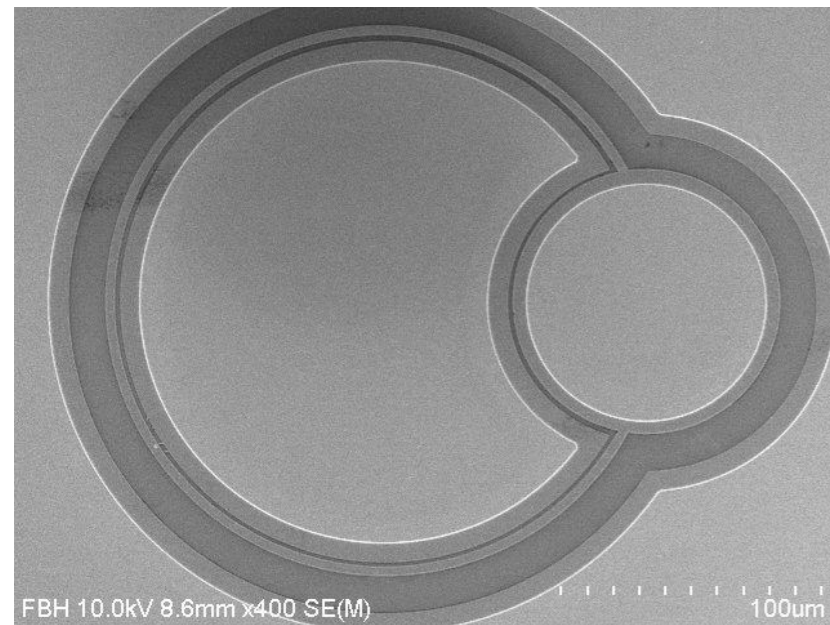


Fig. 1. SEM viewgraph of a round MISFET fabricated on n-doped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100).

Due to its outstanding material properties, the ultra-wide-bandgap semiconductor gallium oxide ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) has attracted great attention in recent years for next-generation power electronic applications. The high bandgap of around 4.5 - 4.9 eV and the expected Baliga's figure of merit are promising indicators to pave the way for realizing power devices with even higher breakdown voltages and efficiencies than their SiC and GaN counterparts. In collaboration with Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ), first state-of-the-art metal-insulator-semiconductor field-effect transistors (MISFETs) based on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) substrates and homoepitaxial n-doped layers grown by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) were successfully processed at FBH, demonstrating promising switching performances of the transistor devices.

To avoid complex device isolation, thus achieving reliable operation of the transistors,

a circular layout was used for the MISFET design as shown in Fig. 1. Gates with a length and width of 3.5 μm and 628 μm respectively were formed by Pt/Au metal electron-beam evaporation and subsequent resist lift-off. A 40 nm Al_2O_3 layer serves as gate oxide for the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MISFETs. It was realized by plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD) combined with in-situ NH_3 plasma surface pre-treatment prior to gate metallization. The PEALD process step was developed and performed in cooperation with SENTECH. Source and drain ohmic contacts were fabricated by Ti/Au metallization after surface conditioning in BCl_3 -Ar plasma, followed by a rapid thermal annealing step. Transmission line measurements showed linear I-V characteristics, revealing contact and sheet resistances of 3 Ωmm and 4 $\text{k}\Omega/\text{sq.}$, respectively. All pad areas were reinforced by 750 nm thick Ti/Au metallization in order to withstand direct probing on the inner transistor area. Finally, the devices were annealed at 350 $^\circ\text{C}$

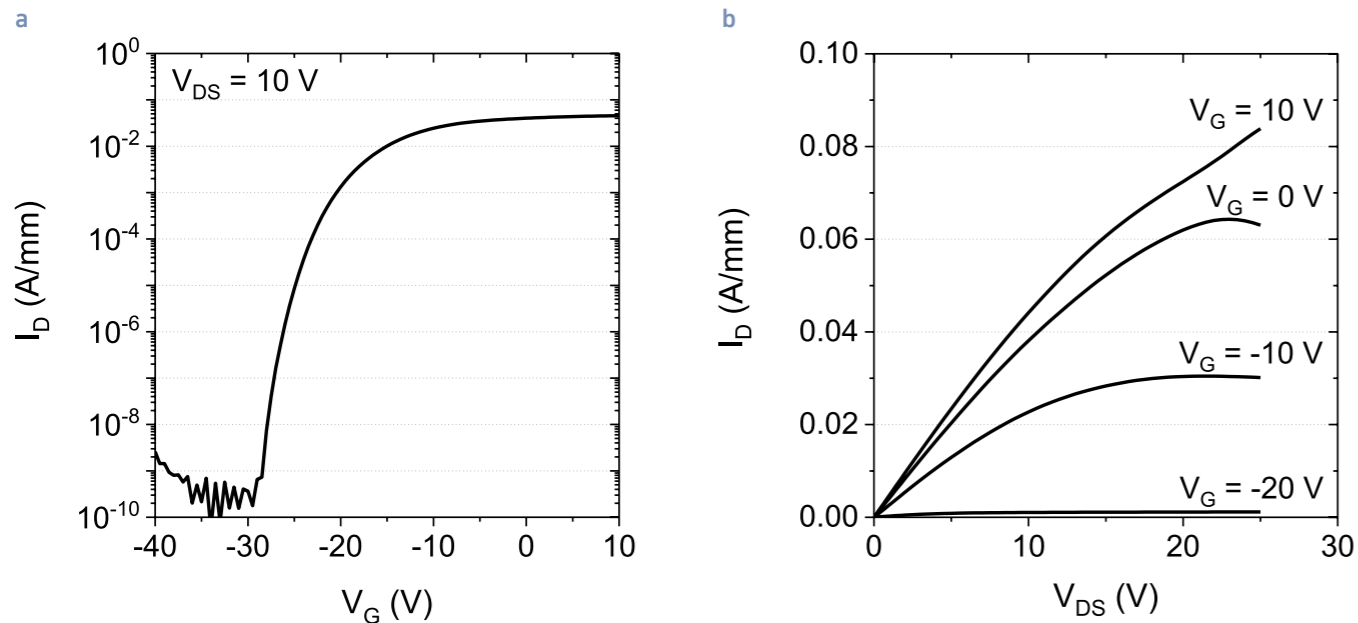


Fig. 2. Transfer (a) and output (b) characteristics of a $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) MISFET.

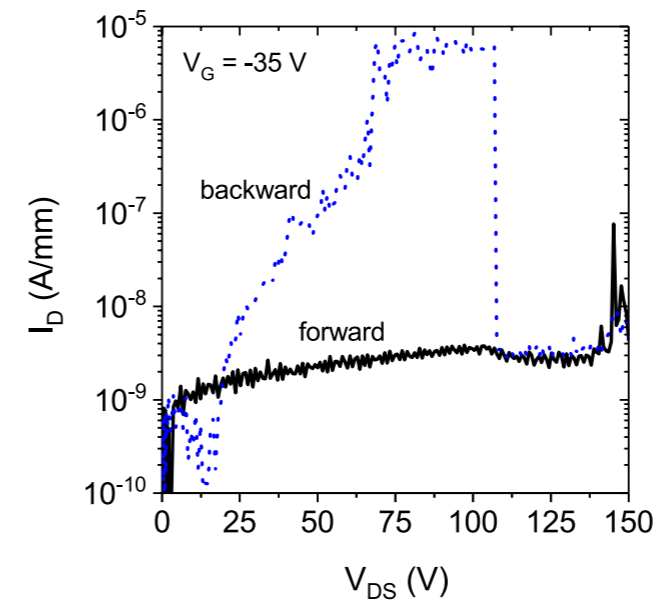


Fig. 3. Results of three-terminal breakdown measurements of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) MISFET.

using an optimized procedure. The latter treatment has turned out to be crucial for achieving low leakage currents.

Fig. 2a shows the transfer characteristic of a $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) MISFET measured at a drain voltage of 10 V. The transistor pinches off at around -23 V. Subthreshold drain and gate currents are below 10^{-10} A/mm. The measurement was limited by current resolution of the standard setup used. This result gives a large $I_{\text{ON/OFF}}$ ratio of higher than 10^9 . An output characteristic of the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) MISFET is presented in Fig. 2b. At a drain voltage of 25 V, drain current levels of 84 mA/mm could be demonstrated at +10 V gate bias. In addition, transconductance values of 2.2 to 2.9 mS/mm and on-resistances of 240 to 320 Ωmm were obtained. All parameters obtained are comparable to the current state of the art.

In conclusion, by combining high-performance $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ epitaxy with optimized processing and high-quality Al_2O_3 PEALD gate insulator technology state-of-the-art devices could be realized. The results demonstrate a promising technology baseline towards larger $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ devices for power electronics applications.

Die Anforderungen an elektronische Bauelemente in der Leistungselektronik steigen; insbesondere eine höhere Spannungsfestigkeit ist gefragt. Daher befasst sich das FBH intensiv mit neuen Halbleitermaterialien, deren Materialeigenschaften das Potenzial bieten, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Galliumoxid (Ga_2O_3) ist diesbezüglich vielversprechend, da sich der Halbleiter durch eine sehr weite Bandlücke von etwa 4,5 - 4,9 eV auszeichnet. Daraus lässt sich eine hohe Durchschlagfestigkeit mit Werten weit über denen von Galliumnitrid oder Siliziumcarbid ableiten. Damit reduziert sich der notwendige Gate/Drain-Abstand im Transistor signifikant, wodurch Halbleiterschalter noch kompakter und effizienter hergestellt werden können. Im Rahmen erster Untersuchungen konnten am FBH erfolgreich Ga_2O_3 -Leistungstransistoren hergestellt werden, die sich durch einen Drainstrom von 84 mA/mm, einem Ein/Aus-Schaltverhältnis von 10^9 sowie einem Einschaltwiderstand von bis zu 240 Ωmm auszeichnen. Diese ersten vielversprechenden Ergebnisse sind die Voraussetzung für noch größere und effizientere Leistungstransistoren der nächsten Generation.

Publications

P. Kurpas, E. Bahat-Treidel, O. Hilt, R.-S. Unger, N. Volkmer, I. Ostermay, M. Baldini, G. Wagner, H. Gargouri, F. Naumann, G. Tränkle, J. Würfl, " $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) MISFETs for power electronics applications", Proceedings of the 41st Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe (WOCSDICE), Las Palmas de Gran Canaria, Spain (2017).

E. Bahat Treidel, F. Naumann, H. Gargouri, O. Hilt, B. Martinez, J. Würfl, "Systematic study on plasma enhanced atomic layer deposited Al_2O_3 on GaN", Proceedings of the 47th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (SISC), San Diego, USA (2016).

For further information:



<https://www.fbh-berlin.com/research/iii-v-electronics>

III-V Technology

III/V-Technologie

III/V-Technologie

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 und III/V-Elektronik:

- **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 GaN- und AlGaN-Substrate und -Templates geforscht.
- **Epitaxie Arsenide** – Heterostrukturen für GaAs-Laserdioden sowohl für die Bauelemententwicklung am FBH als auch für externe Kunden. Darüber hinaus werden SAM-Strukturen für gepulste Lasersysteme entwickelt.
- **Prozesstechnologie** – Prozesse für eine Vielzahl von Bauelementen auf Basis von GaAs, InP und GaN auf Waferdurchmessern von 2" bis 4" wie auch auf den neuartigen Materialien AlN und Ga₂O₃. Diese werden auf der industriekompatiblen und zugleich flexiblen Prozesslinie durchgeführt und beständig weiterentwickelt.
- **InP Devices & SciFab** – InP-HBTs für THz-Frequenzen, die die Basis für die THz-Systeme am FBH darstellen. Integriert mit Si-BiCMOS-Schaltkreisen wird diese Technologie in Kooperation mit dem Leibniz-Institut IHP auch für externe Kunden bereitgestellt.
- **Aufbau- und Verbindungstechnik** – die Bauelemente werden auf Wärmesenken oder in Gehäuse eingebaut und damit für den Aufbau von Modulen und Systemen nutzbar gemacht.
- **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.

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

III-V Technology

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 and III-V electronics 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 GaN and AlGaN substrates and templates are developed.
- **Epitaxy arsenides** – heterostructures for GaAs laser diodes for device development at FBH as well as for external customers. Also, SAM structures for pulsed laser systems are fabricated.
- **Process technology** – processes for a large variety of devices based on GaAs, InP, and GaN on wafers from 2" to 4" in diameter as well as on novel materials such as AlN and Ga₂O₃. These are carried out and continuously improved on a process line that is compatible with industry standards, offering high flexibility at the same time.
- **InP devices & SciFab** – InP HBTs for THz frequencies form the basis for FBH THz systems. Monolithically integrated with Si BiCMOS circuits, this technology is also made available to external customers in cooperation with the Leibniz institute IHP.
- **Mounting & assembly** – devices are mounted onto heat sinks or into packages to allow for integration into modules and systems.
- **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.

We also make our technological infrastructure available to external partners, for whom we carry out process modules, deliver epitaxial wafers or develop and build demonstrator systems.

Sputtered AlN as base layer for UV LEDs

Development of AlGaN-based UV light-emitting diodes (LEDs) is quite a challenge, since AlN bulk material is very expensive and not yet available in sufficient quantity for LED production. As alternative solution, thin AlN layers grown by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) on bulk sapphire substrates are commonly used as base layers for UV LEDs. However, AlN seed layers obtained in this way suffer from a high defect density, in particular high threading dislocation density (TDD). Such defects can propagate into the LED structure, where they lead to non-radiative recombination and thus lower the efficiency of the devices (Fig. 1). To date, a widespread approach is to deposit AlN as thick as possible on sapphire to profit from the mutual annihilation of the dislocations with increasing layer thickness. This requires a sophisticated strain management to avoid layer cracking by excessive tensile strain. The current FBH approach to lower tensile strain comprises multiple MOVPE overgrowth steps (including epitaxial lateral overgrowth – ELO) and time-consuming, expensive intermediate surface patterning by photolithography and plasma etching to allow for up to 8 μm thick uncracked AlN layers. Consequently, there is a great need to simplify the AlN base layer technology for UV LED production.



Fig. 1. Simplified schematic, cross section sketch of an LED structure. Threading dislocations propagate from the AlN/sapphire interface into the active region and hinder light generation (dark areas).

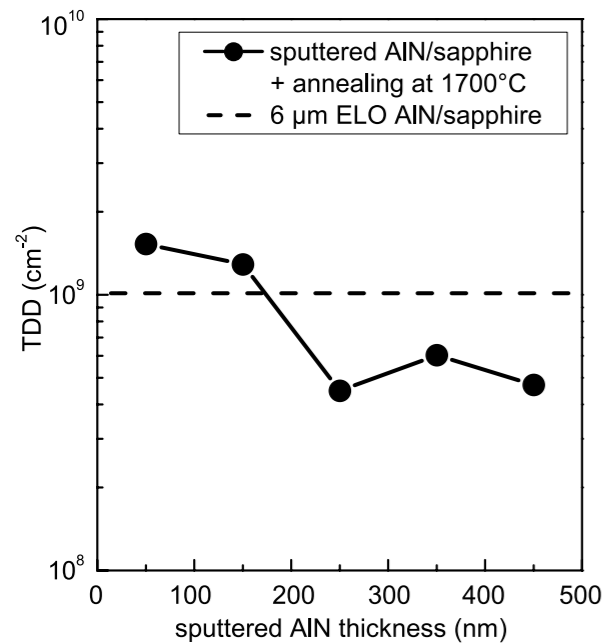


Fig. 2. Threading dislocation density (TDD) of sputtered, annealed AlN on sapphire plotted against the AlN layer thickness. For comparison, TDD commonly reached for 6 μm ELO-AlN grown by MOVPE (dashed line).

As a result, the suitability of reactively sputtered AlN (50 nm to 450 nm thickness) on sapphire as base layers was investigated. Since sputtered AlN nuclei grow highly twisted against each other on sapphire substrates, such layers are not suited for LED structures. To improve the sputtered AlN grain alignment and to form closed well-oriented AlN layers with low defect densities, the material was annealed for 3 h at relatively high temperatures of about 1700 °C. Subsequently, such layers exhibit only TDDs of down to $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$, which is half the TDD of usual ELO AlN layers (Fig. 2). They are therefore well suited as base layers. TDD is not the only crucial property for successful growth of LED heterostructures, a smooth surface of the base layer is needed in addition. Rough surfaces with step heights above 10 nm can lead to a non-uniform distribution of Al and Ga in the AlGaIn active region and thus to undesired, parasitic luminescence. After high temperature annealing, we found areas with distorted AlN surface spatially related to aluminum oxynitride (AlON) formation. Therefore, the interplay of AlN/sapphire interface stabilization and parameters like annealing temperature, sputtered layer thickness and annealing environment were investigated more closely. It was found that the extent of AlON formation can be reduced with increasing sputtered layer thickness and decreasing annealing temperature.

Atomically smooth surfaces were achieved by growing 400 nm MOVPE AlN under step flow conditions on 150 nm and 350 nm thick sputtered AlN that had been annealed at 1700 °C. On these AlN base layers, UVC LED heterostructures with 270 nm emission wavelength were realized within FBH's Joint Lab GaN Optoelectronics operated together with TU Berlin. Fig. 3 shows the corresponding output powers (measured on-wafer) and external quantum efficiencies (EQE) in comparison to the same LED heterostructure grown on a 6 μm thick ELO AlN base layer. The output power on 350 nm sputtered annealed AlN is higher than on 150 nm thick sputtered annealed AlN, which corresponds to the different TDDs for both layer thicknesses (Fig. 2). The output powers on 350 nm sputtered annealed AlN and on ELO AlN were 0.35 mW and 0.39 mW at 20 mA, respectively. The slightly higher output power on the ELO AlN base layer is due to enhanced light extraction by patterned AlN/sapphire interface.

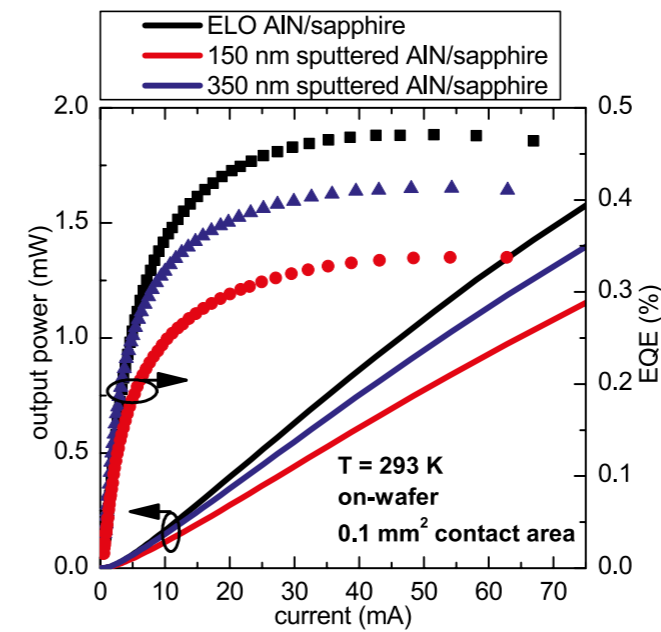


Fig. 3. Output power and external quantum efficiency (EQE) measured on-wafer for UV LEDs emitting at 270 nm grown on 150 nm (red) and 350 nm (blue) sputtered AlN/sapphire (annealed at 1700 °C) and ELO AlN/sapphire (black).

Zur Herstellung AlGaIn-basierter UV-LEDs werden AlN-Keimschichten benötigt, die üblicherweise auf Saphirsubstraten mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) aufgewachsen werden. Diese Schichten haben jedoch eine hohe Versetzungsdichte (TDD), die in der aktiven Zone der LEDs zu unerwünschter, nichtstrahlender Rekombination führt. Um die TDD weiter zu reduzieren, wurde am FBH gesputtertes AlN mit < 1 μm Dicke auf Saphir untersucht. Durch Erhitzen des Materials auf 1700 °C wurden TDDs von nur noch $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ erreicht – eine Halbierung der Defektdichte gegenüber herkömmlichem, mit MOVPE-gewachsenem AlN. Jedoch war die Kristalloberfläche anschließend teilweise durch Aluminiumoxynitrid gestört, das sich durch das Erhitzen gebildet hatte. Daher wurde dieser Prozess weiter optimiert. So ist es gelungen, auf optimierten AlN-Basissschichten UV-C-LEDs mit einer Emissionswellenlänge von 270 nm und einer Ausgangsleistung von 0,35 mW bei 20 mA im Rahmen des gemeinsamen Joint Lab GaN Optoelectronics mit der TU Berlin erfolgreich zu realisieren.

Publication

N. Susilo, S. Hagedorn, D. Jaeger, H. Miyake, U. Zeimer, C. Reich, B. Neuschulz, L. Sulmoni, M. Guttman, F. Mehnke, C. Kuhn, T. Wernicke, M. Weyers, M. Kneissl, "AlGaIn-based deep UV LEDs grown on sputtered and high temperature annealed AlN/ sapphire" Appl. Phys. Lett. 112, 041110 (2018).

Nevertheless, the results show that high temperature annealing of sputtered AlN is a highly promising approach for AlN base layers with a TDD below $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$. Additionally, the procedure of sputtered and annealed AlN on sapphire avoids difficult polarity and strain control that is necessary during nucleation of AlN on sapphire in an MOVPE reactor. Furthermore, decreased residual AlN layer thicknesses on sapphire lead to a decreased residual wafer bow and therefore enable higher accuracy in photolithography-based processing and sample handling.

This work was partially supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) through the consortia project *Advanced UV for Life* under contract 03ZZ0134B.

Development of improved packaging for high-power UV LEDs



Fig. 1. AlN SMD cavity package with soldered $1 \times 1 \text{ mm}^2$ UVB LED chip, Zener diodes for ESD protection and glass lid.

High-power and reliable UVB LEDs emitting in the wavelength range from 280 nm - 320 nm are required for applications such as medical phototherapy, plant growth lighting, and UV curing. While considerable efforts are still necessary to improve the efficiency of the UV LED chip itself, packaging also plays an important role to achieve optimum performance of the devices.

Until recently, UV LED chips at FBH were soldered onto planar AlN SMD packages ($3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$) with deposited $\sim 4 \text{ }\mu\text{m}$ thick $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ solder. Although this package provides good heat dissipation, it is hard to realize encapsulation, hermetic sealing and simultaneous soldering of many chips in a batch mode. Furthermore, this housing is expensive and not compatible with commercially available UV LED packages. Therefore, the FBH has qualified a new cavity SMD package for $1 \times 1 \text{ mm}^2$ high-power UVB LED chips (Fig. 1). It offers efficient heat dissipation and allows hermetic capping, using an UV-transparent glass lid. Moreover, batch processing is possible by simultaneously soldering LED chips onto an array of packages, which are subsequently separated by simple snap break. This leads to lower costs and a higher throughput.

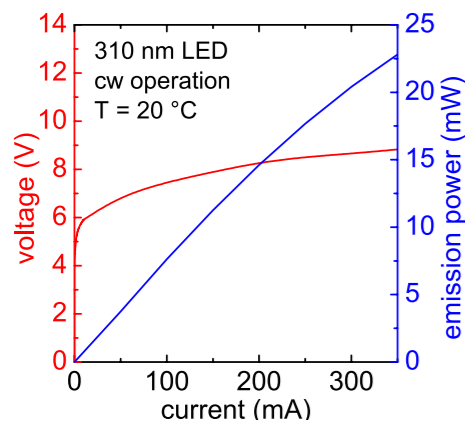


Fig. 2. Current-voltage-emission power characteristic of a high-power 310 nm LED chip packaged in an AlN SMD cavity package.

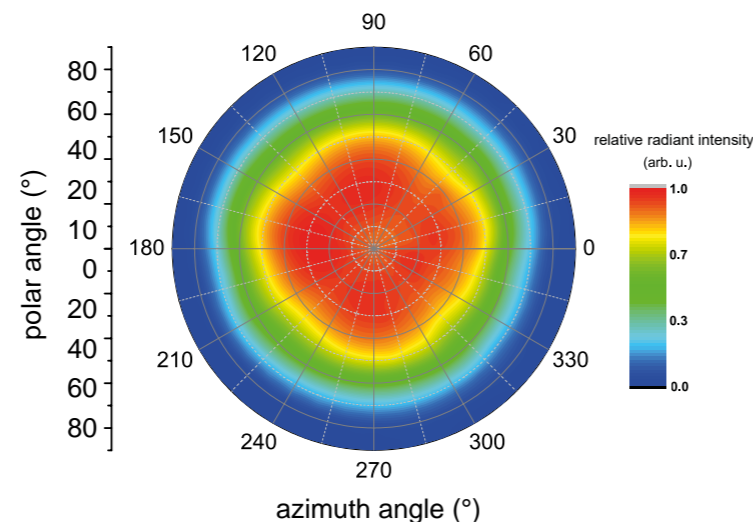


Fig. 3. Far-field radiation pattern of a high-power 310 nm LED packaged in an AlN SMD cavity package.

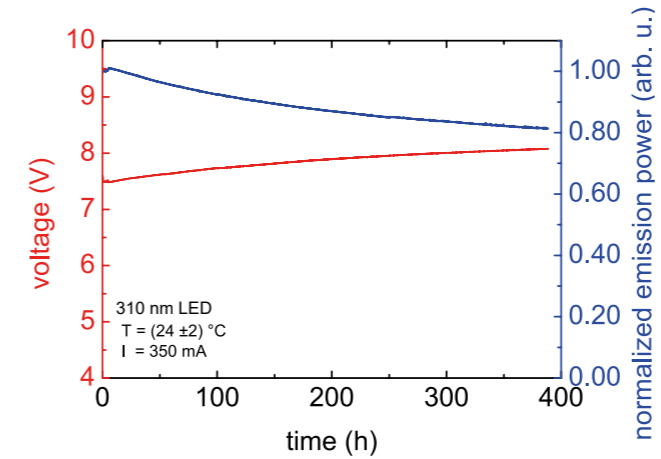


Fig. 4. Integrated optical power (normalized to $t = 0 \text{ h}$) and drive voltage as a function of operation time for one representative UVB LED stressed at 350 mA and 24 °C.

The high-power UVB LED package ($3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$) consists of AlN multilayer ceramics with a high thermal conductivity of $150 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. 3D electrical interconnections enable SMD mounting while the $600 \text{ }\mu\text{m}$ deep cavity allows for simple chip protection by either encapsulation or mounting of lenses or lids. For the packaging process, $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ solder paste is deposited in the cavity by automatic dispensing. The UVB LED chips are flipped, placed and soldered with a flip-chip bonder. After the reflow process, the solder thickness is around $15 \text{ }\mu\text{m}$. To protect the LEDs against ESD damage, two Zener diodes are also mounted into the package using a conducting glue and wire bonding. Shear and electro-optical tests confirm the successful mounting process. A glass lid, with a metallized gold ring and an $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ preform attached to it, is soldered to the gold plated surface of the cavity package. Due to the two high-temperature AuSn processes, the SMD package can easily be soldered to a PCB by using a standard solder such as Sn 96.5/Ag 3.0/Cu 0.5 with a melting temperature of 217 °C

without re-melting the previous bonds. The newly developed packaging technology successfully demonstrated a yield greater than 95 %.

Electro-optical measurements of the packaged UVB LEDs (Fig. 2) show that they can be operated at a current of 350 mA with an operating voltage of 9 V, which results in an output power greater than 20 mW. Despite the shadowing effect resulting from the cavity and reflections at the glass lid, about 70 % of the light emitted from the chip leaves the package. The far-field radiation pattern of the LEDs was measured, and the reduced emission angle was again attributed to shadowing by the cavity of the package (Fig. 3). To test the stability of the package, the UVB LEDs were stressed at 350 mA at a constant temperature of 24 °C (actively cooled). The output power decreased by 20 % within the first 400 h of operation (Fig. 4), which is comparable to similar chips soldered on planar AlN packages.

In conclusion, performance, yield and cost aspects of the new AlN SMD cavity package are promising for the integration of high-power UVB LEDs in commercial applications, requiring high UV powers, low costs and durability in harsh environments.

This work was partially supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) through the consortia project *Advanced UV for Life* under contracts 03ZZ0129B, 03ZZ0130A and 03ZZ0134B.

Das FBH entwickelt UV-LEDs mit hoher Leistung im UV-B-Spektralbereich (280 nm bis 320 nm). Deren Leistungsfähigkeit und Herstellungskosten hängen wesentlich von der Montage der LED-Chips in einem geeigneten Gehäuse ab. Daher wurde am FBH ein neues SMD-Kavitätsgehäuse aus AlN qualifiziert, das neben einem geringen thermischen Widerstand weitere Vorteile bietet. So können die UV-B-LEDs einfach hermetisch verpackt und im Batchbetrieb montiert werden. UV-B-LED-Chips werden dabei mit $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ -Lotpaste in das Kavitätsgehäuse gelötet und anschließend mit einem UV-transparenten Glasdeckel geschützt. Elektrooptische Messungen zeigen, dass 70 % des vom UV-B-LED-Chip emittierten Lichtes das Gehäuse verlässt und die Lebensdauer durch den Montageprozess nicht beeinträchtigt wird. Durch die hohe Ausbeute sowie die geringen Kosten ist die entwickelte Montagetechnologie ideal für kommerzielle Anwendungen von Hochleistungs-UV-B-LEDs geeignet.

Fabrication of monolithic optical microsystems for the stabilization of light sources

Photonic integrated circuits (PICs) comprising multiple photonic functions on a single chip are the backbone of optical networks in modern communication technology. Recently, they have also demonstrated their capability as sensors for applications in highly corrosive environments – as acceleration and motion sensors as well as biosensors. Passive optical microsystems require several key building blocks. These include waveguides to direct light due to internal reflection, couplers for light distribution, and optical resonators as narrow bandwidth frequency filters. Light sources such as monolithic tunable lasers or externally modulated lasers for the visible and near infrared wavelength range are realized in material systems such as GaAs and InP. Classical materials for fiber waveguides are glass and silicon dioxide (quartz) that exhibit very low absorption in the visible and near-infrared spectral range. However, their index of refraction is below that of GaAs and InP, consequently, glass or quartz waveguides located on top of GaAs and InP will not work as the light will be absorbed by the semiconductor.

As a step towards integration of passive components on materials with a high index of refraction, FBH has demonstrated on-chip integration of an optical micro resonator interfaced with a waveguide in silicon dioxide on a silicon wafer. The chip process was performed on commercial 3" silicon wafers coated with silicon dioxide. Long trenches were formed parallel to the waveguide that allow selective etching of the silicon substrate below the silicon dioxide waveguide. Thereby the waveguide becomes part of a suspended membrane or a jib, and light propagation is not disturbed by the strongly absorbing silicon. An example of a designed system manufactured in the system silicon/silicon dioxide is shown in Fig. 1, with details in Fig. 2.

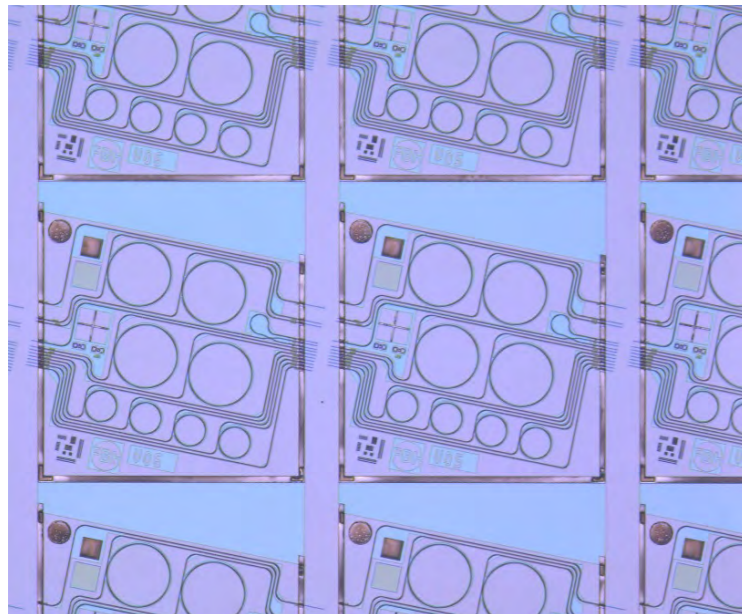


Fig. 1. Microresonator systems for wavelength stabilization designed and manufactured at FBH. Each system consists of four 1000 µm resonators, four 500 µm ring resonators, some reference waveguides, and an x-coupling device.

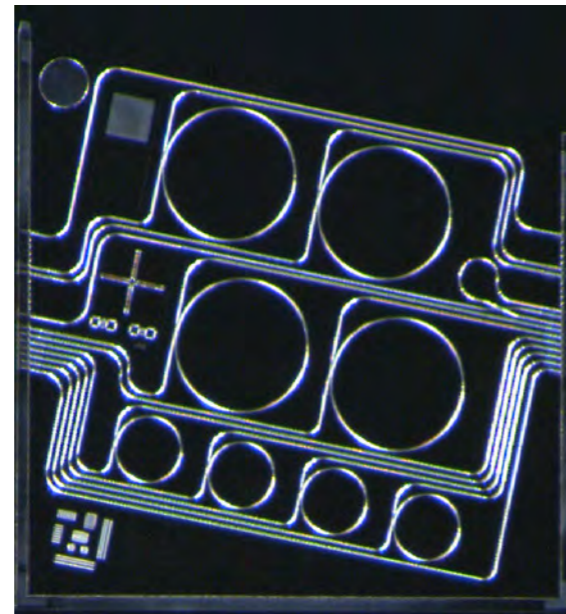


Fig. 2. Dark field photograph of a single chip from Fig. 1, highlighting the micro optical systems.

FBH has further optimized the process flow for the fabrication of the miniature waveguide structures. It now comprises three lithographic layers and allows for the combination of high-resolution electron beam lithography and stepper lithography. In a first process step, overlay and alignment structures as well as the chamfers of the waveguides are created by means of optical lithography and etching. Then, the waveguides and resonators are formed by lithographic patterning and plasma etching. One particularly challenging process step is the control of the miniature gap necessary for light coupling between ring resonator and waveguide. To facilitate fabrication of this sensitive device region, the selectivity of the etch process between photoresist



Fig. 3. Input section of the resonator system with slanted chamfers.

and waveguide material was optimized. A highly selective etch process allows to minimize the photoresist thickness, which is a prerequisite to lithographically obtain the required resist topography. The last lithographic step defines the trench for wet-chemical under etching of the silicon dioxide to remove the silicon and release waveguides and ring resonators. Etching is accomplished by using a mixture of hydrofluoric acid, nitric acid, and acetic acid. As the wet etch process of the silicon is not 100 % selective with respect to silicon dioxide, the top of the delicate waveguide structures is protected by a photoresist layer to avoid thinning of the waveguides. Before dicing, the wafer receives a resist layer to protect the delicate structures. Dicing is again a sensitive step as the cut has to be within some micrometers of the chamfer of the waveguide without creating any damage. Fig. 3 shows an SEM image of an input section with slanted chamfers and recessed trenches for optical insulation of the silica membrane from silicon.

Coupling between waveguide and ring resonator depends on their cross sections. Here, small cross sections are favorable to achieve a high quality factor of the overall system. At the chamfer of the waveguide, however, where light is coupled into the guide from an external source, a large cross section is favorable to increase the coupled light intensity. To maintain the preferred quadratic cross section for the basic mode of the waveguide, the lateral dimensions and the thickness of the waveguide should be shrunk appropriately on the way from the chamfer to the resonator. FBH has developed an additional process step allowing to increase the lateral and vertical waveguide size at the chamfer, thereby enabling to optimize the external coupling geometry without trade-offs in quality factor and coupling of the ring resonator.

The fabricated systems were optically characterized. The results (see also p. 86) prove the concept of on-chip integration of optical systems in silicon dioxide on high refractive index materials. They pave the way for further developments towards PICs for advanced optical communication technology and evolving quantum technologies.

This work was accomplished in the framework of the project *Integrated micro resonator stabilised light source for quantum metrology* (IBB 101 594 65).

Am FBH wurde ein Prozessfluss zur Herstellung von optischen Mikrosystemen im Materialsystem Siliziumdioxid auf Silizium optimiert. Dieser umfasst drei lithografische Ebenen und erlaubt es, Elektronenstrahl- und optische Lithografie zu kombinieren. Zunächst wurden dabei Alignment- und Overlaystrukturen hergestellt und die Facetten geätzt, anschließend Wellenleiter und Ringresonatoren in einem optimierten Plasmaätzschritt geformt. Durch eine höhere Ätzelektivität zwischen Resist und Oxid konnte die benötigte Resistschichtdicke verringert werden, wodurch sich die kritische Stelle der Kopplung zwischen Wellenleiter und Mikroresonatoren lithografisch besser auflösen und ätzen lässt. Um die Einkoppeleffizienz an der Facette zu erhöhen, wurde ein zusätzliches Prozessmodul entwickelt, mit dem der Wellenleiter im Bereich der Facette lateral und vertikal aufgeweitet wird. Das vereinfacht das Einkoppeln von Licht an der Facette, ohne den Querschnitt oder den Abstand von Wellenleiter und Resonator im Koppelbereich zu beeinträchtigen. Abschließend wird auf Waferlevel das Basismaterial mit einem nasschemischen Ätzschritt entfernt, ein Lack als Schutzschicht für die optischen Mikrosysteme aufgebracht und die Vereinzelung mittels Sägen vorgenommen.

Advancing the high-frequency performance of FBH's InP MMIC process – development of epitaxial structure and device scaling

Because of their outstanding cut-off frequencies and relatively large breakdown voltages, InP-based semiconductor components provide relatively high output powers, especially at submillimeter wavelengths (frequencies higher than 300 GHz). Therefore, InP microelectronics currently becomes key to enable larger scale applications filling the technological gap at terahertz frequencies. FBH has developed a suitable InP double heterostructure bipolar transistor (DHBT) microwave monolithic integrated circuit (MMIC) process in recent years (see Fig. 1). The focus was on realizing a market-ready process with high quality passive components and a wiring stack of 3 gold metal layers optimized for high-frequency circuits. The cross section in Fig. 2 illustrates the developed process. Building on this solid foundation, FBH's focus and aim is now shifting towards realizing transistors with higher cut-off frequencies, targeting maximum frequency of oscillation f_{max} close to 1 THz within the next years – see also development roadmap in Fig. 3, referring to achievements accomplished in 2017.

The feature that most distinguishes FBH's InP MMIC process from others is the transfer of the epitaxial layer grown on an InP substrate wafer to another substrate wafer – this can be a full processed BiCMOS wafer, an aluminum nitride or silicon wafer, as shown in Fig. 2. Transfer is done after the definition of emitter (E) and base (B), and the formation of the ground metal (GD) by adhesive wafer bonding. Subsequent removal of the complete InP wafer by wet-chemical etching using HCl gives access to the back side of the epitaxial layers. The collector (C) is then formed, and the residual epitaxial layers are removed, reducing fringing capacitances compared to a standard triple mesa process. The remaining stack is built up embedded in BCB, which offers low losses and permittivity at millimeter and submillimeter wavelengths. Therefore, higher cut-off frequencies can be achieved at relaxed critical transistor dimensions (technology node). With our standard process we achieved cut-off frequencies $f_T = 350$ GHz and $f_{max} = 350$ GHz at an emitter width of $0.8 \mu\text{m}$, shown as blue circle in Fig. 3. In 2017, FBH was the first to realize InP DHBTs with a GaAsSb base in a transferred-substrate process for extrinsic parasitic removal [1]. The GaAsSb base allows for higher breakdown voltages (here >4.5 V) than an InGaAs base and thus for higher output powers. The epitaxial structure was grown at ETH Zurich by MOVPE. With an emitter width of $0.4 \mu\text{m}$, cut-off frequencies $f_T = 360$ GHz and $f_{max} = 530$ GHz were achieved, shown as golden circle in Fig. 3. With the 250 nm node currently

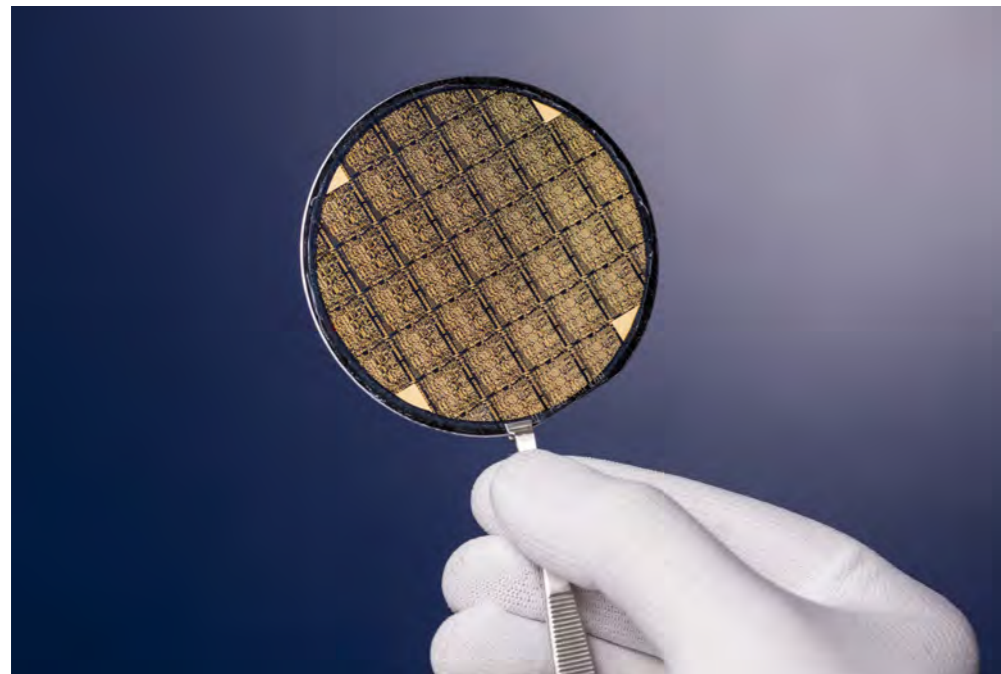


Fig. 1. Fully processed wafer with monolithic integrated circuits based on InP HBTs.

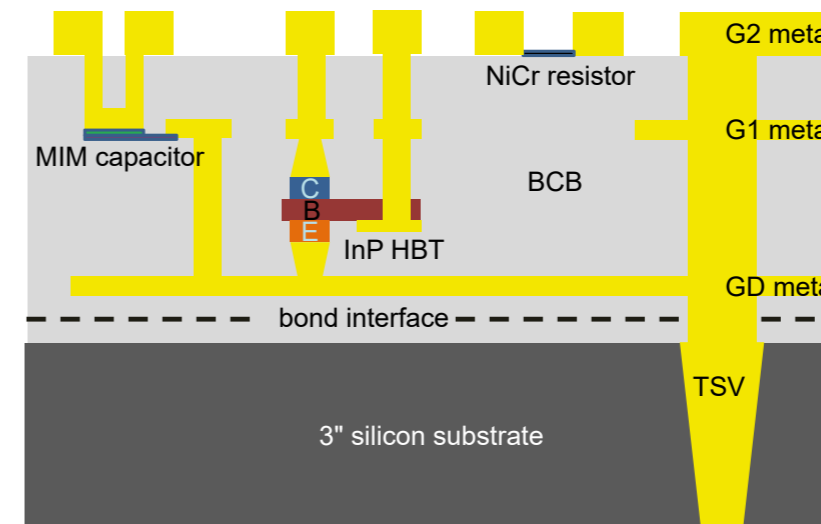


Fig. 2. Cross section (not to scale) of FBH's DHBT InP MMIC process with its high quality passive components and a wiring stack of 3 gold metal layers.

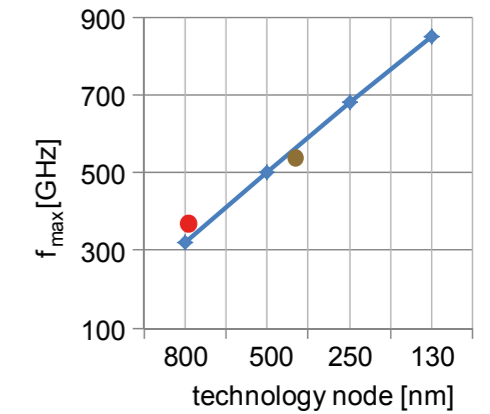


Fig. 3. FBH's development roadmap showing maximum frequency of oscillation f_{max} vs. technology node targeted f_{max} values (blue diamonds), $f_{max} = 350$ GHz reached with our standard process at a 800 nm node (red circle), and $f_{max} = 530$ GHz reached at 400 nm (gold circle) being the first realization of InP DHBTs with a GaAsSb base in a transferred-substrate process for extrinsic parasitic removal.

being in process, further device downscaling is to be expected. Further improvements in the maximum frequency of oscillation are the optimization of the base contacts. Details are described on p. 126.

With increasing high-frequency performance of transistors, also circuits at higher frequencies become feasible requiring new assembly strategies. FBH has developed a low-cost flip-chip mounting technology for assemblies up to 500 GHz with broadband interconnects [2,3].

This work was supported in part by the Leibniz Association within the Leibniz Competition projects *THz InP HBT*. Further support was given by the European Commission from the Horizon2020 program under the project *Ultrawave*.

Monolithisch-integrierte Mikrowellenschaltungen (MMIC) auf Indiumphosphid-Basis ermöglichen dank ihrer herausragenden Grenzfrequenzen und der relativ hohen Durchbruchspannungen hohe Ausgangsleistungen. Das gilt insbesondere für Submillimeterwellenlängen, d.h. Frequenzen größer als 300 GHz. Diese Eigenschaften machen sie zu Schlüsselkomponenten, mit denen sich die technische Lücke im Terahertzbereich schließen lässt. Das FBH hat in den letzten Jahren einen entsprechenden InP-HBT-MMIC-Prozess zur Marktreife entwickelt und damit verschiedene Schaltungen erfolgreich hergestellt. Künftig sollen die Grenzfrequenzen durch Skalierung der Transistoren, Weiterentwicklung des Epitaxieaufbaus und Kontaktoptimierung weiter erhöht werden. 2017 hat das FBH InP-HBTs mit GaAsSb-Basis realisiert, deren epitaktische Struktur an der ETH Zürich mittels MOVPE gewachsen wurde. Bei einer Emittierweite von $0,4 \mu\text{m}$ wurden Grenzfrequenzen von $f_T = 360$ GHz und $f_{max} = 530$ GHz erreicht. Diese Transistoren wurden erstmalig in einem Transfersubstratprozess hergestellt, bei dem verglichen mit einem 3-fach-Mesaprozess die externen Kapazitäten stark reduziert wurden. Zusätzlich können damit InP-Schaltungen beispielsweise auf einem BiCMOS-Wafer heterointegriert werden.

Publications

[1] N. Weimann, T. Johansen, D. Stoppel, M. Matalla, M. Brahem, K. Nosaeva, S. Boppel, N. Volkmer, I. Ostermay, V. Krozer, O. Ostinelli, C. Bolognesi, "Transferred substrate InP/GaAsSb heterojunction bipolar transistor technology with $f_{max} > 0.53$ THz" IEEE Transactions on Electron Devices, accepted (2018).

[2] N. Weimann, S. Monayakul, S. Sinha, F. Schmückle, M. Hrobak, D. Stoppel, W. John, O. Krüger, R. Doerner, B. Janke, V. Krozer, W. Heinrich, "Manufacturable low-cost flip-chip mounting technology for 300 – 500 GHz assemblies", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., vol. 7, no. 4, pp. 494-501 (2017).

[3] S. Sinha, R. Doerner, F.-J. Schmückle, S. Monayakul, M. Hrobak, N. Weimann, V. Krozer, W. Heinrich, "Flip-chip approach for 500 GHz broadband interconnects", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 65, no. 4, pp. 1215-1225 (2017).

Advancing the high-frequency performance of FBH's InP MMIC process – optimization of the ohmic contacts

To a large extent, the successful operation of modern transistors and photonic devices is determined by the quality of their ohmic contacts. The contact resistance can be seriously affected by a number of undesirable factors that influence conduction. These include interface layers due to oxide formation, energetically deep lying traps or levels, ion-induced surface damage, as well as diffusion into the semiconductor when exposed to thermal processing or when operated at high current densities. To that effect, FBH has optimized the base contacts of its double heterostructure bipolar transistors (DHBT) of the InP MMIC process, which is also described on p. 124. In this process, the DHBTs are exposed to curing at 240 °C for 7 hours during fabrication of the entire stack, which degrades transistor operation.

Conventional Pt-based contacts to p-InGaAs are widely used as standard metal scheme in the DHBT fabrication process. A series of experiments uncovered that these contacts are extremely sensitive to thermal treatments and easily diffuse into the semiconductor. Focused ion beam and EDX depth profiling were carried out to assess the microstructure at the interface, revealing the presence of an intermediate layer consisting of a Pt-In-Ga-As multicomponent phase. Furthermore, the presence of voids inside the remaining Pt layer indicates a strong metal diffusion into the semiconductor layer. A thin native oxide layer, which was present before contact annealing on the InGaAs surface, completely decomposes during this process step and may assist void formation inside the Pt layer.

As a result, deterioration of the crystal structure occurs and increased recombination and resistivity at the interface reduces the DC current gain, compromising the RF performance of the transistor. Therefore, contacts that can guarantee a thermally stable behavior are desired for state-of-the-art transistors.

Refractory metals such as W, Mo, and Ir are good candidates for high current densities transistors, as they possess lower diffusivity through the semiconductor at high temperatures than transition metals. A novel base metallization scheme has been developed using iridium as contact layer. This material was chosen because of its favorably high conductivity, presenting a reasonably low Schottky barrier to the carbon-doped InGaAs in addition. Low energy ion bombardment to remove the oxides was avoided, since it introduces radiation damage and deep states in the forbidden bandgap. A hydrofluoric acid solution for surface preparation was used instead. More importantly, the composition of the metal stack was varied to stabilize the contact resistivity when thermally stressed.

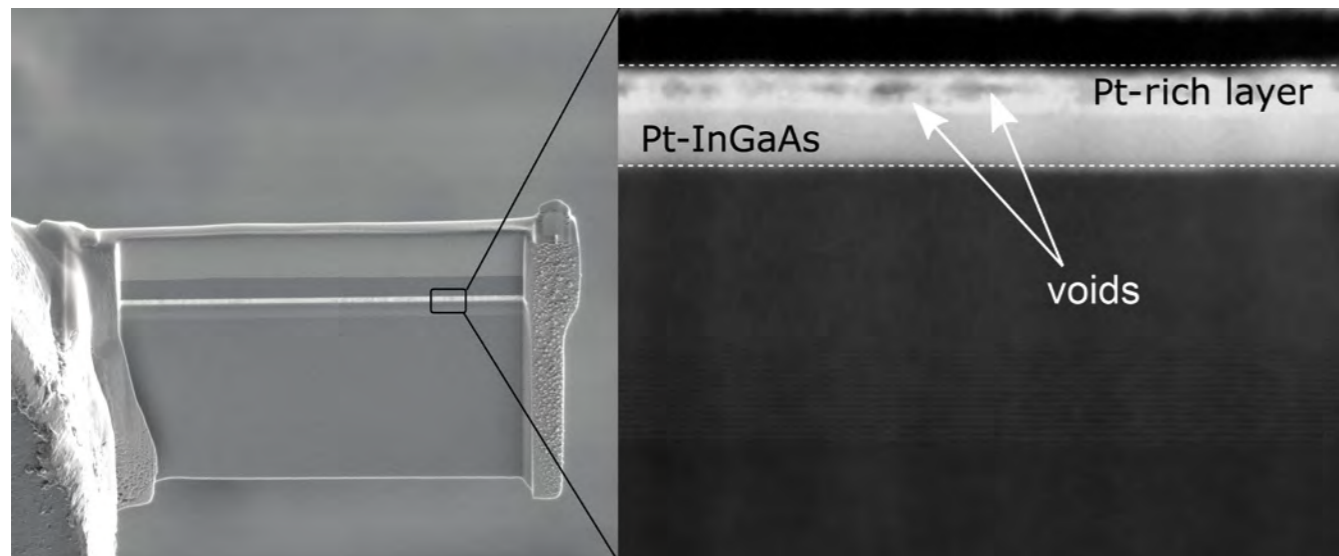


Fig. 1. SEM image of a thin lamella prepared for STEM analysis by focused ion beam (left) and a Z-contrast STEM image of an annealed Pt metal stack (right). Intermixing between the two materials and voids are suspected to be responsible for the degradation of the ohmic contact.

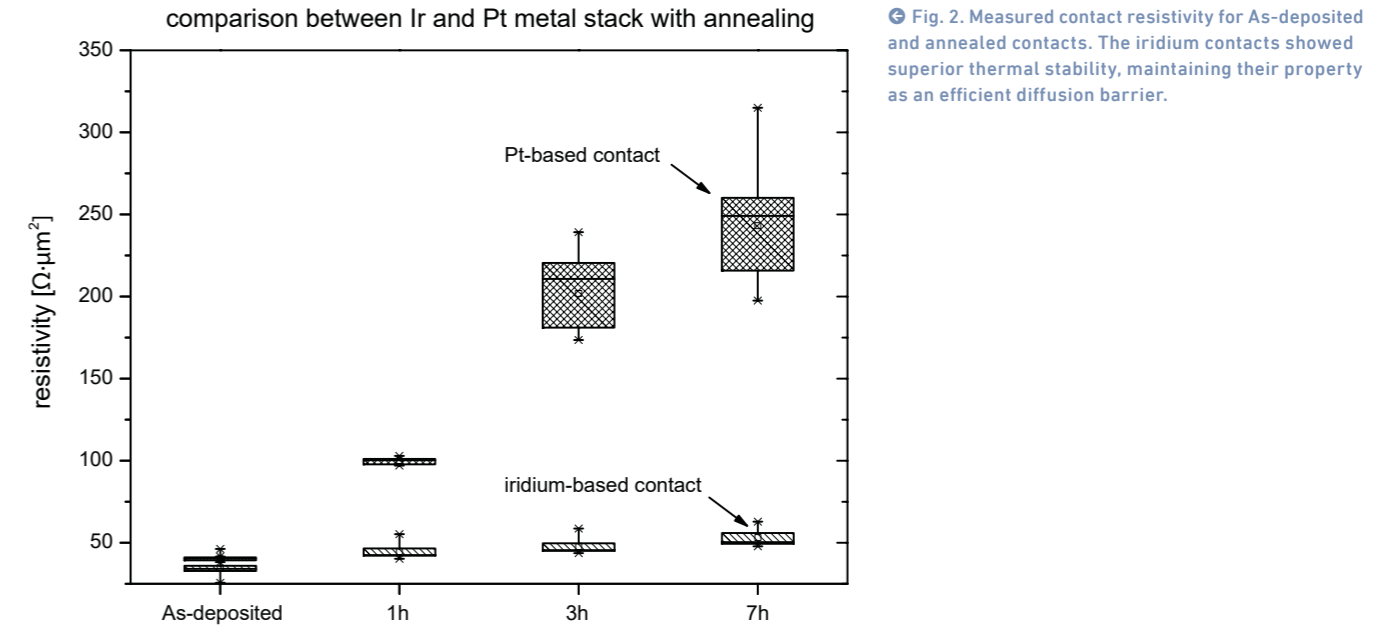


Fig. 2. Measured contact resistivity for As-deposited and annealed contacts. The iridium contacts showed superior thermal stability, maintaining their property as an efficient diffusion barrier.

Multilayer ohmic contacts with iridium as first layer were sequentially evaporated by e-beam onto the TLM-structured samples under ultra-high vacuum conditions. Special care was taken to ensure small lithographic and measurement errors. As-deposited, the contact offered a resistance and resistivity comparable to the conventional stack. In contrast to the Pt-based contact, the iridium contact exhibited an improved behavior through the thermally driven reaction, with a sharp and stable microstructural interface and no detectable formation of Ir-In-Ga-As compounds. The pure field emission current transport was reflected in the linear IV characteristic. Negligible increase in specific contact resistance was observed even when annealed for 7 hours, demonstrating excellent reliability properties as illustrated by Fig. 2.

The optimized contacts are currently being introduced into FBH's standard MMIC process.

Die Heterobipolar-Transistoren werden zum Aufbau des Metallstapels im MMIC-Prozess des FBHs (vgl. auch S. 124) insgesamt sieben Stunden lang einer Temperatur von 240 °C ausgesetzt. Derartig hohe Temperaturen und der Betrieb bei hohen Stromdichten verschlechtern jedoch die Transistorkontakte und vermindern die Transistorgrenzfrequenzen. Daher hat das FBH 2017 die Basiskontakte entsprechend optimiert. Teststrukturen zeigten den starken Einfluss der Temperatur auf Kontakte auf Pt-Basis – sowohl in Querschnitten, die mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB) hergestellt wurden, als auch bei der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit. Kontakte auf Ir-Basis, das als Refraktärmetall ausgewählt wurde, zeigten sich unter den Prozessbedingungen in Verbindung mit einer angepassten Vorbehandlung stabil und weitgehend unbeeinflusst. Die derart optimierten Kontakte werden am FBH nun in den Standard-MMIC-Prozess überführt.

For further information:


<https://www.fbh-berlin.com/research/iii-v-technology>

Facts & Figures

Zahlen & Fakten

Founded 1992
Gegründet 1992

Staff Team



Scientists
Wissenschaftlerinnen
& Wissenschaftler



PhD candidates
Promovierende



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



Trainees
Auszubildende



Projects Laufende Projekte



Publications (peer reviewed) Publikationen (referiert)



Patents Patente



Talks (invited) Vorträge (eingeladene)

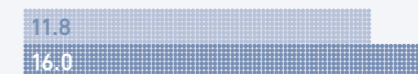


Budget (in million Euros) Umsatz (Mio. Euro)

Basic funding: State of Berlin
and Federal Government
Grundfinanzierung durch das
Land Berlin und den Bund



Public project funding
Öffentliche Drittmittel



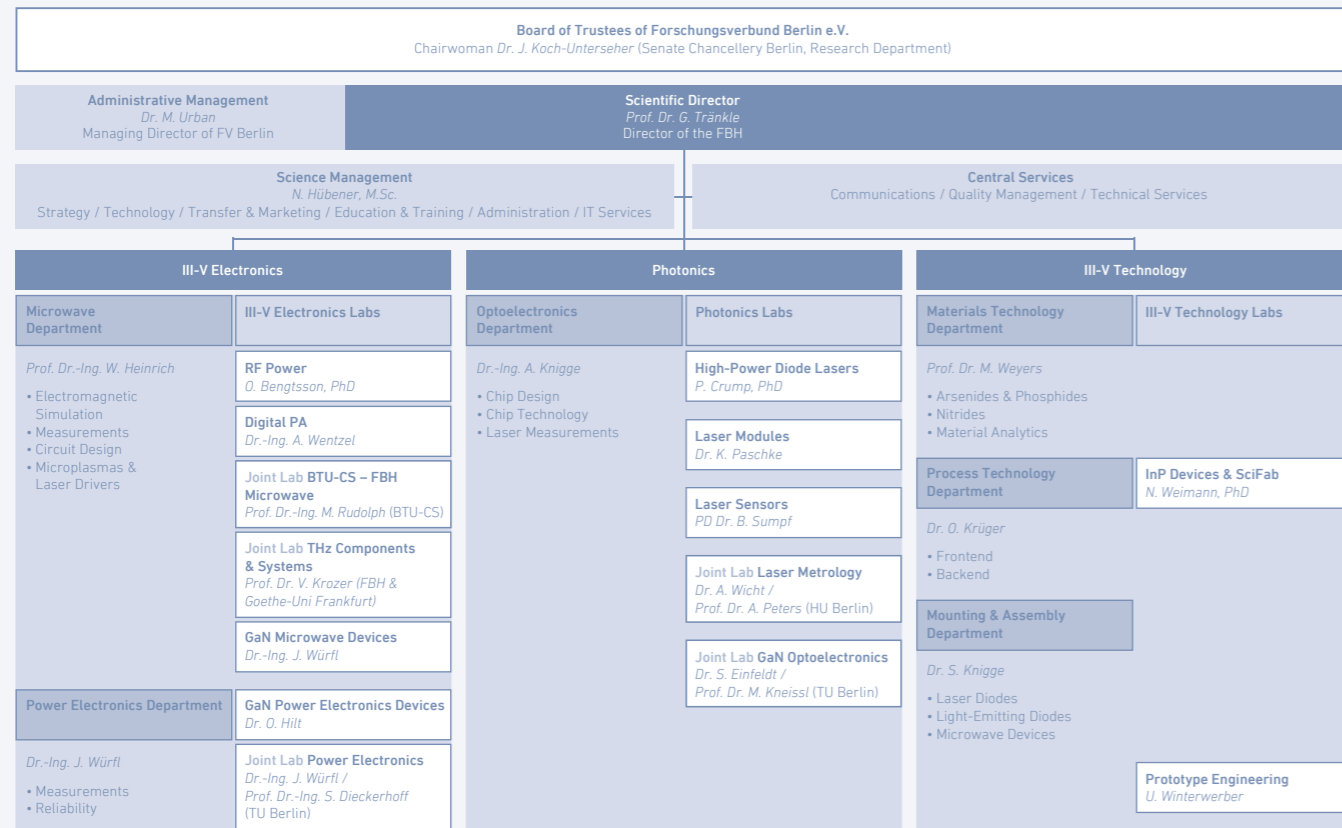
Industrial contracts
Industrielle Auftragsforschung



2016
2017

Organizational chart

Organigramm



Scientific advisory board

Wissenschaftlicher Beirat

Members Mitglieder

Dr. Erich Auer Besigheim	Dr.-Ing. Christian Schmitz TRUMPF GmbH & Co. KG, Ditzingen
Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth Universität Stuttgart	Dr. Ulrich Steegmüller Osram Opto Semiconductors GmbH, Regensburg
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bösch Technische Universität Graz (A)	Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker Technische Universität Berlin
Dr. Thomas Fehn SPI Lasers, Southampton (UK)	Prof. Jelena Vuckovic Stanford University (USA)
Dr. Patrick Scheele HENSOLDT Sensors GmbH, Ulm	

The Forschungsverbund Berlin e.V. represents eight research institutes in Berlin – one of them being the Ferdinand-Braun-Institut. The institutes are active in the fields of natural sciences, life sciences, and environmental sciences. They pursue common interests within the framework of a single legal entity while maintaining their scientific autonomy. As research institutes of national scientific importance, they are jointly funded by the German federal and state governments. The institutes share an administrative infrastructure (Common Administration, Head Dr. Manuela Urban) and are members of the Leibniz Association, which unites 93 independent research institutions.

Der Forschungsverbund Berlin e.V., zu dem auch das Ferdinand-Braun-Institut gehört, ist Träger von acht natur-, lebens- und umweltwissenschaftlichen Forschungsinstituten in Berlin. Alle Institute sind wissenschaftlich eigenständig, nehmen aber im Rahmen einer einheitlichen Rechtspersönlichkeit gemeinsame Interessen wahr. Als Forschungseinrichtungen von überregionaler Bedeutung und gesamtstaatlichem wissenschaftspolitischen Interesse werden die Institute im Rahmen der gemeinsamen Forschungsförderung von Bund und Ländern finanziert. Sie verfügen über eine gemeinsame administrative Infrastruktur (Verbundverwaltung, Geschäftsführerin Dr. Manuela Urban) und sind Mitglieder der Leibniz-Gemeinschaft, die 93 selbständige Forschungseinrichtungen verbindet.

www.fv-berlin.de

www.leibniz-gemeinschaft.de

Contact

Kontakt

Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik im Forschungsverbund Berlin e.V. Gustav-Kirchhoff-Str. 4 12489 Berlin, Germany	Phone +49.30.6392-2600 Fax +49.30.6392-2602 Email fbh@fbh-berlin.de Web www.fbh-berlin.de
---	--

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

Assistant to the Director Referentin der Institutsleitung	Doreen Friedrich, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH) Phone +49.30.6392-3391 doreen.friedrich@fbh-berlin.de
--	--

Science Management Wissenschaftsmanagement	Nicolas Hübener, M.Sc., Dipl. Kfm. (FH) Phone +49.30.6392-3396 nicolas.huebener@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	Deputy Director Stellvertretender Direktor Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich Phone +49.30.6392-2620 wolfgang.heinrich@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
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin, Germany
Phone +49.30.6392-2600
Fax +49.30.6392-2602
Email fbh@fbh-berlin.de
Web www.fbh-berlin.de

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

© Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin 2018

Editors *Redaktion*
Gisela Gurr, Petra Immerz

Layout & Typesetting *Layout & Satz*
Pitch Black Graphic Design, Berlin/Den Haag

Printing *Druck*
Prototyp Print, Berlin

Images & Graphics *Fotos & Grafiken*

K. Bilo: p. 2
D. Stoppel: p. 7
M. V. Trovato: p. 9
P. Immerz: pp. 13, 15 (bottom), 16, 23, 27, 29, 32, 36, 40, 45, 46, 51 (top), 58, 59, 60, 84 (top), 98 (bottom)
B. Schurian: pp. 14, 15 (top), 17, 18, 21, 25, 26, 33, 34, 37, 38, 39, 76 (top), 78 (top), 88 (top), 91, 120 (top), 124
ESA: p. 19
IGZ: p. 22
Tosat-Spacecom: p. 24
BeamXpert: p. 30
ANH Berlin: p. 44, 62
D. Ausserhofer: p. 47
Messe München: p. 48
A.-J. Maurer: p. 49
OptecBB/Lerch: p. 50
Wista-Management: p. 51 (bottom)
Die Fotografen: p. 52
brity bay: p. 61
ViNN:Lab/TH Wildau: p. 64
further / weitere: FBH



Leibniz
**Ferdinand
Braun
Institut**

Ferdinand-Braun-Institut
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin

www.fbh-berlin.de