

**Annual Report**  
*Jahresbericht*  
**2014**



Leibniz  
**Ferdinand  
Braun  
Institut**



**Annual Report**  
*Jahresbericht*  
**2014**

Several times 'excellent' – this is how the international expert group assessed the status and the work results of the Ferdinand-Braun-Institut in the evaluation process of the Leibniz Association. This 'grading' boils down the pleasant result of the scheduled evaluation in June 2014 to its essence. According to the report of the Senate of the Leibniz Association, the institute has impressively managed to increase the already very high level of performance and ranks among the internationally most renowned centers of competence in the field of III-V semiconductor technology. The committee therefore fully recommends continued support of the FBH without any restrictions to the federal and state governments. These outstanding results also confirm the basic alignment of our institute and the courses we set to further boost our competitive edge in an international environment. I would like to take this opportunity to thank our employees as well as our funding authorities and partners, who have always supported us on this way and inspired us with their input to explore new horizons.



In many cases we break new ground with our developments and yet always bear the potential application in mind. We explore and develop, for example, world-wide unique digital amplifier architectures for the wireless infrastructure. The focus here is on power amplifiers since they determine the efficiency of the overall system and thus its costs. Eventually, a fully digitally realized transmitter shall be available offering an efficient power handling management and highest flexibility regarding, for example, modulation schemes. A further example for the basic- as well as application-oriented research are very efficient and lightning-fast gallium nitride power switches developed within the EU project HiPoSwitch. They are the basis for energy-saving, compact, and light-weight power converters that make electrical energy usable. The market potential is huge as such converters can be found in almost every device. In a pioneering achievement, eight European partners from research and industry joined forces within this project managed by the FBH and successfully developed normally-off gallium nitride power transistors through to the prototype.

What happens next? Our developments further aim on bridging the gap between basic and application-oriented research. It is planned, at the same time, to advance our technologies and research results even more towards application up to the final system. With our new Prototype Engineering Group we have created the necessary interface between science and industry, transferring excellent developments even more quickly into market-oriented products, processes, and services. By means of functionally-efficient models and prototypes, we offer companies easy access to results representing the current state of the art in research. The Prototype Engineering Group hereby closely cooperates with FBH's research groups and develops tailor-made functional demonstrators. In the field of UV light-emitting diodes, for example, a special module examining the effect of ultraviolet light on the production of secondary metabolites in plants has been developed and manufactured. Based on the results, the optimum wavelength and intensity of radiation can be determined, which makes sure that the health-promoting substances in vegetables are selectively produced. With the result that the consumer in the supermarket might also benefit from this. Also in laser sensors a portable functional model has been developed in a joint effort of the research team with the Prototype Engineering Group. It has been successfully tested in a field experiment. With it, comprehensive high-precision measurements directly at the place of production became possible – without detour over the laboratory.

With increasing development depth and complexity the number of national and international research projects equally rises. In 2014, 290 employees at FBH have been – directly and indirectly – involved in handling our more than 180 research projects. In order to ensure that the institute can operate effectively, bearing in mind its size, a couple of structural adjustments is currently initiated. They will be further developed within the next years. Many research groups like the hybrid laser systems, laser sensors, or laser metrology that are presently organized within business areas have grown strongly in recent years, so that these groups will be acting independently as 'labs' in the future. These units will be dealing with

their respective topics within the photonics and III-V electronics field of expertise, but will carry on cooperating closely with the departments that supply the technical resources and the basic know-how of the institute. With this structure, we create organizational units that can handle very specific issues in a flexible way.

As of autumn 2015, the 1,800 square meters big extension building is ready to move into, providing modern laboratory and office space for the labs and the Prototype Engineering Group, in which they will bundle their activities. It is absolutely essential that we operate technical facilities allowing us to conduct research at the most advanced level. In order to maintain our excellent technical equipment, we have to substitute tools need-based and in due time. In this regard, we count on further favorable backing from our funding authorities.

I am looking forward to further exciting developments and the sound cooperation with all of you, and I am also hoping that you enjoy reading through 2014's results and events.

Yours sincerely,

Günther Tränkle

*Gleich mehrfach „exzellent“, so bewertete die internationale Gutachtergruppe im Evaluierungsverfahren der Leibniz-Gemeinschaft den Status und die Arbeitsergebnisse des Ferdinand-Braun-Instituts. Diese „Benotung“ bringt das erfreuliche Ergebnis der turnusgemäß im Juni 2014 durchgeführten Evaluierung des FBH auf den Punkt. Es sei dem Institut eindrucksvoll gelungen, das bereits sehr hohe Leistungsniveau weiter zu steigern. International zähle es zu den renommiertesten Kompetenzzentren im Bereich der III/V-Halbleitertechnologie. Mit diesen Worten empfiehlt der Senat der Leibniz-Gemeinschaft in seiner Stellungnahme den Zuwendungsgebern aus Bund und Land das Institut uneingeschränkt weiter zu fördern. Diese hervorragenden Ergebnisse bestätigen die grundlegende Ausrichtung unseres Instituts und die Weichen, die wir gestellt haben, um auch künftig international wettbewerbsfähig agieren zu können. Mein Dank gilt an dieser Stelle allen unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, unseren Zuwendungsgebern und Partnern, die uns auf diesem Weg stets nachhaltig unterstützt und mit ihrem Input zu Neuem angeregt haben.*

*Mit unseren Entwicklungen betreten wir vielfach Neuland und behalten dennoch stets die potenzielle Applikation im Blick. So erforschen und entwickeln wir unter anderem weltweit einzigartige digitale Verstärkerarchitekturen für die mobile Kommunikation. Der Fokus liegt dabei auf den Leistungsverstärkern, denn sie bestimmen die Effizienz des Gesamtsystems und damit auch seine Kosten. Das Ziel ist der komplett digital realisierte Transmitter, der ein effizientes Leistungsmanagement und höchste Flexibilität, etwa bei den Modulationsverfahren, bietet. Ein weiteres Beispiel für ebenso grundlegende wie anwendungsnahe Forschungen sind sehr effiziente und blitzschnelle Galliumnitrid-Leistungsschalter, die im EU-Projekt HiPoSwitch entwickelt wurden. Sie sind die Basis für energiesparende, kompakte und leichte Leistungskonverter, die elektrische Energie nutzbar machen. Das Marktpotenzial ist riesig, da solche Wandler in beinahe jedem Gerät sitzen. In dem vom FBH geleiteten Projekt ist es den acht europäischen Partnern aus Forschung und Industrie in einer Pionierleistung gelungen, selbstsperrende Galliumnitrid-Leistungstransistoren bis zum Prototypen zu entwickeln.*

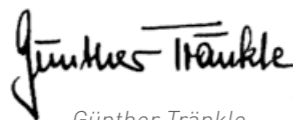
*Wie sehen unsere nächsten Schritte aus? Unsere Entwicklungen zielen weiterhin auf den Brückenschlag zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung. Geplant ist zugleich, unsere Technologien und Forschungsergebnisse künftig noch stärker in Richtung Applikation bis zum fertigen System weiterentwickeln. Mit unserem neuen Entwicklungszentrum haben wir die nötige Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft geschaffen, mit der wir exzellente Entwicklungen noch schneller in marktorientierte Produkte, Verfahren und Dienstleistungen überführen. Damit bieten wir Unternehmen einfachen Zugang zu Ergebnissen auf dem aktuellen Stand der Forschung: in Form von praxisgerechten Funktionsmodellen und Prototypen. Das Entwicklungszentrum kooperiert hierbei eng mit den Forschungsgruppen des FBH und entwickelt maßgeschneiderte Forschungsmuster. Im Bereich der UV-Leuchtdioden etwa wurde ein spezielles Modul entwickelt und gefertigt,*

mit dem die Wirkung von ultraviolettem Licht auf die Produktion von Sekundärmetaboliten in Pflanzen untersucht wird. Anhand der Ergebnisse lassen sich die optimale Wellenlänge und Intensität der Bestrahlung ablesen, die dafür sorgen, dass die gesundheitsfördernden Stoffe beispielsweise im Gemüse gezielt gebildet werden. Davon könnten später auch die Endverbraucher im Supermarkt profitieren. Auch in der Lasersensorik wurde ein tragbares Funktionsmuster entwickelt, das aus der engen Zusammenarbeit des Forschungsteams mit dem Entwicklungszentrum entstanden ist. Es wurde in einem Feldversuch erfolgreich eingesetzt. Erstmals sind damit umfassende Messungen mit höchster Präzision direkt auf der Anbaufläche möglich – ohne aufwändige Umwege über das Labor.

Mit der zunehmenden Entwicklungstiefe und Komplexität steigt zugleich unsere Anzahl nationaler wie internationaler Forschungsprojekte. So wurden im Jahr 2014 mehr als 180 Forschungsvorhaben von unseren 290 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern – mittelbar und unmittelbar – bearbeitet. Diese stabile Größe des Instituts erfordert eine Reihe struktureller Anpassungen, die wir derzeit in die Wege leiten und in den nächsten Jahren weiterentwickeln werden. Viele Arbeitsgruppen in den bisherigen Geschäftsbereichen, wie etwa die hybriden Lasersysteme, Lasersensorik oder Lasermetrologie, sind so stark gewachsen, dass sie künftig eigenständig in „Labs“ agieren werden. Sie bearbeiten ihre Themen in den Bereichen Photonik und III/V-Elektronik eigenverantwortlich, stimmen sich aber weiterhin eng mit den fachlichen Abteilungen ab, die die technischen Ressourcen und das grundlegende Know-how bereithalten. Damit schaffen wir flexiblere Organisationseinheiten, die sehr spezifische Fragestellungen bearbeiten.

Ab Herbst 2015 ist der 1.800 Quadratmeter große Erweiterungsbau des Ferdinand-Braun-Instituts bezugsfertig. Dort stehen den Labs und dem Entwicklungszentrum moderne Labor- und Büroräume zur Verfügung, in denen sie ihre Aktivitäten bündeln. Dabei ist es unabdingbar, dass wir eine technische Ausstattung bereithalten, die Forschung auf dem neuesten technischen Stand ermöglicht. Um unsere ausgezeichnete technische Ausrüstung zu erhalten, müssen wir daher immer wieder Geräte bedarfsgerecht ersetzen. Hierbei hoffen wir auf die weiterhin wohlwollende Unterstützung durch unsere Zuwendungsgeber.

Ich freue mich auf weiterhin spannende Entwicklungen und die gute Zusammenarbeit mit Ihnen allen. Eine anregende Lektüre der Ergebnisse und Ereignisse aus dem Jahr 2014 wünscht Ihnen, Ihr



Günther Tränkle

## Table of contents Inhaltsverzeichnis

7	<b>Profile</b> Profil
19	<b>Highlights</b> Schlaglichter
47	<b>Science Management</b> Wissenschaftsmanagement
57	<b>Microwave Components &amp; Systems</b> Mikrowellenkomponenten & -systeme
60	Progress in the field of digital power amplifiers
62	Circuit design and characterization for THz frequencies – building blocks for transmitter and receiver modules
64	Plasmonic devices for THz detection and emission
66	Drivers for high-power pulsed laser sources
69	<b>GaN Electronics</b> GaN-Elektronik
72	GaN X-band process for multi-project MMIC designs
74	Progress of Ka-band GaN MMIC development
76	High-voltage low-dispersive normally-off GaN switches
78	Joint Lab Power Electronics – bundling expertise
81	<b>Diode Lasers</b> Diodenlaser
84	High-power pump modules for high-energy short-pulse solid-state lasers
86	Ultra-compact semiconductor-based phase modulators for optical data communication in the Gb/s range
88	Red-emitting highly coherent diode lasers for holographic displays
90	Diode laser-based light source for deep ultraviolet Raman excitation
92	Ultra-narrow linewidth semiconductor laser sources for precision measurements
95	<b>GaN Optoelectronics</b> GaN-Optoelektronik
98	High-power UV-B LEDs with long lifetimes
100	Pushing the wavelength limits of UV-C LEDs
102	Narrow-band InGaN MQW laser diodes for the blue-violet spectral region
104	Near field filamentation in violet (Al,In)GaN laser diodes

107 **Materials & Processes**  
*Materialien & Prozesse*

- 110 Bottom illumination of solar-blind AlGaIn MSM photodetectors – tailoring the polarization effects to achieve EQE up to 70 %
- 112 High-quality semi-polar GaN on 100 mm diameter patterned sapphire
- 114 Hydride vapor phase epitaxy of bulk-like AlGaIn layers
- 116 Strain management in AlAs<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>/GaAs-based distributed Bragg reflectors
- 118 SciFab: wafer-level heterointegration of InP DHBT and Si BiCMOS for mm-wave RF electronics
- 120 Flip-chip interconnects for sub-THz applications
- 122 Diamond heat spreading layer integration with InP sub-THz transistors
- 124 Process optimization for through-substrate vias in SiC



**Profile**  
*Profil*

## FBH at a glance



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 systems. 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 as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources that operate with economic low-voltage drivers are fabricated for use in a variety of applications, such as the treatment of skin diseases.

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 to 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. Thus, working in strategic partnerships with industry, FBH assures Germany's technological excellence in microwave and optoelectronic research.

## Das FBH im Profil

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 Bedarfsweldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme und Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit Niederspannungsversorgung entwickelt es für medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Hauterkrankungen.

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.



## Mission statement



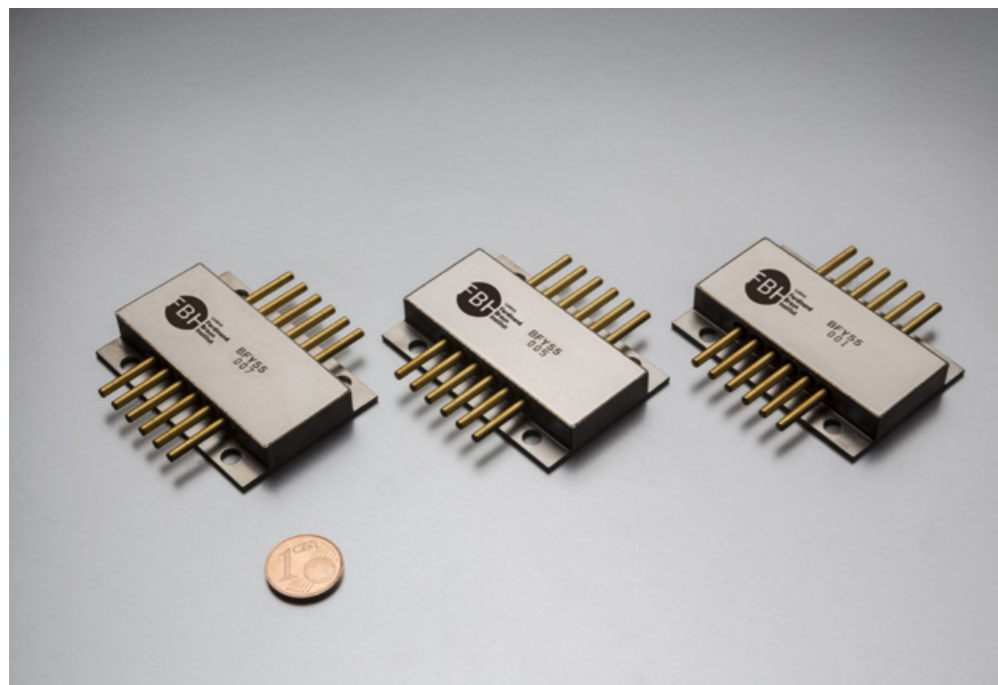
### ... translating ideas into innovations

- 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.

## Leitbild

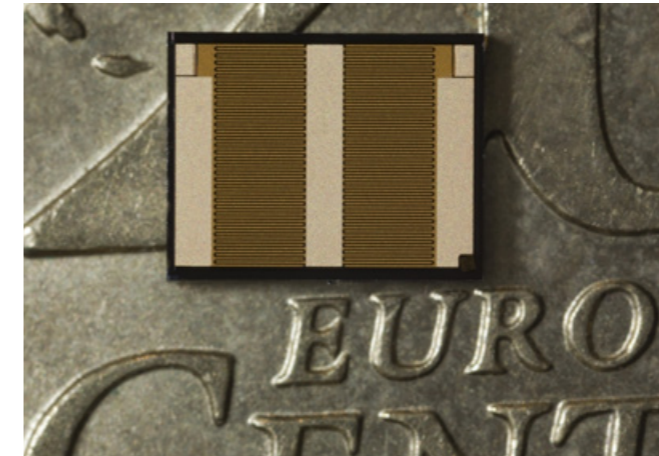
### ... translating ideas into innovations

- *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.*



## Business areas & research

- **Microwave Components & Systems**
  - Front ends up to 100 GHz
  - Power amplifiers up to 10 GHz
  - Low-noise components
  - Microwave plasma sources
  - Terahertz electronics
  - Power modules
- **GaN Electronics**
  - Microwave transistors & MMICs
  - Power electronics
- **Diode Lasers**
  - Broad area lasers & bars
  - High-brightness & short pulsed lasers
- Hybrid laser modules
- Laser sensors
- Laser metrology
- **GaN Optoelectronics**
  - UV LEDs
  - Nitride laser diodes
- **Materials & Process Technology**
  - GaN HVPE
  - Special optical devices
  - In-situ control techniques for MOVPE & HVPE
  - Laser micro processing
- **Science Management**
  - Technology transfer & marketing
  - Education & training management
  - Administration
  - IT support



## Geschäftsbereiche & Forschung

- **Mikrowellenkomponenten & -systeme**
  - Frontends bis 100 GHz
  - Leistungsverstärker bis 10 GHz
  - Low-Noise-Komponenten
  - Mikrowellen-Plasmaquellen
  - Terahertz-Elektronik
  - Leistungsmodule
- **GaN-Elektronik**
  - Mikrowellentransistoren & MMICs
  - Leistungselektronik
- **Diodenlaser**
  - Breitstreifen & Barren
  - Hochbrillante & gepulste Laser
  - Hybride Lasermodule
  - Lasersensorik
  - Lasermetrologie
- **GaN-Optoelektronik**
  - UV-LEDs
  - Nitrid-Laserdioden
- **Material- & Prozesstechnologie**
  - GaN-HVPE
  - Optische Sonderbauelemente
  - In-situ Kontrolltechniken bei MOVPE & HVPE
  - Lasermikrostrukturierung
- **Wissenschaftsmanagement**
  - Technologietransfer & Marketing
  - Bildungsmanagement
  - Verwaltung
  - EDV



## Competence & comprehensive services

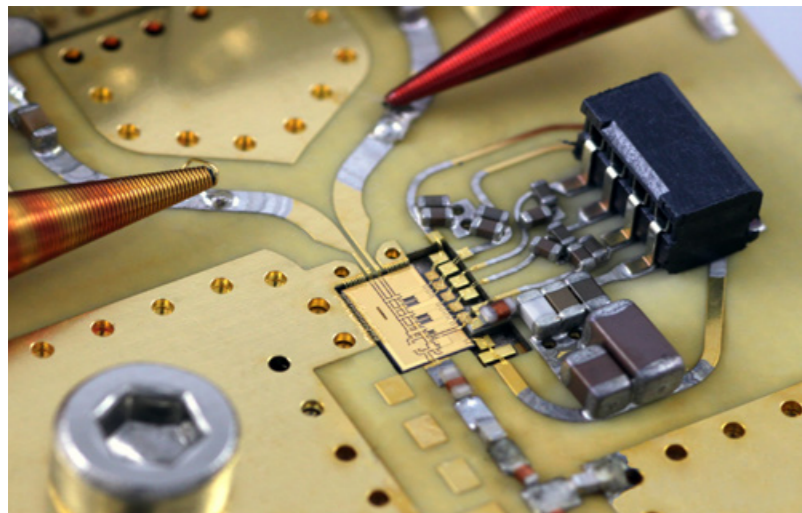
The FBH develops high-value products and services for its partners in the research community and industry which are tailored precisely to fit individual needs. The institute offers its international customer base complete solutions and know-how as a one-stop agency – from design to ready-to-ship modules.

- **Microwave Components & Systems**
  - Gallium nitride electronics: transistors & amplifiers (hybrid, MMIC) – design, production, small-scale series
  - Microwave plasmas
  - Electromagnetic simulation
  - Microwave measurement & device characterization
- **High-Power Diode Lasers & LEDs**
  - Gallium arsenide-based diode lasers with customized properties (output power, wavelength, spectral linewidth, brightness, efficiency) – design, production, small-scale series
- Hybrid laser systems in the IR, visible, and UV spectral range
- Gallium nitride lasers & UV LEDs
- Reliability investigations
- **Processes & Materials**
  - Development and implementation of semiconductor processes (especially III-V semiconductors)
  - Epitaxial growth of customized III-V semiconductor layers
  - Optical components based on gallium arsenide (mirrors, semiconductor disks, SESAMs)
  - UV photodetectors

## Lösungen & Services aus einer Hand

Für Partner aus Forschung und Industrie entwickelt das FBH hochwertige Produkte und Services, die exakt auf individuelle Anforderungen zugeschnitten sind. Seinem internationalen Kundenstamm bietet es Know-how und Komplettlösungen aus einer Hand: vom Entwurf bis zum lieferfähigen Modul.

- **Mikrowellenkomponenten & -systeme**
  - Galliumnitridelektronik: Transistoren & Verstärker (hybrid, MMIC) – Entwurf, Fertigung, Kleinserie
  - Mikrowellenplasmen
  - Elektromagnetische Simulation
  - Hochfrequenz- & Leistungsmesstechnik
- **Hochleistungsdiodenlaser & LEDs**
  - Diodenlaser auf Galliumarsenid-Basis mit maßgeschneiderten Eigenschaften (Leistung, Wellenlänge, Linienbreite, Strahlqualität, Effizienz) – Entwurf, Fertigung, Kleinserie
  - Hybride Lasersysteme im IR-, sichtbaren und UV-Spektralbereich
  - Galliumnitrid-Laser & UV-LEDs
  - Zuverlässigkeitsuntersuchungen
- **Prozesse & Materialien**
  - Entwicklung und Durchführung von Halbleiterprozessen (insbesondere III/V-Halbleiter)
  - Epitaxie kundenspezifischer III/V-Halbleiter-Schichtstrukturen
  - Optische Komponenten aus Galliumarsenid (Spiegel, Halbleiter-Scheiben, SESAMs)
  - UV-Fotodetektoren



## 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 <i>Direktor</i>	Prof. Dr. rer. nat. Günther Tränkle Phone +49.30.6392-2601 guenther.traenkle@fbh-berlin.de
Deputy Director <i>Stellvertretender Direktor</i>	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich Phone +49.30.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
Assistant to the Director <i>Referentin der Institutsleitung</i>	Doreen Friedrich, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH) Phone +49.30.6392-3391 doreen.friedrich@fbh-berlin.de
Optoelectronics / Diode Lasers <i>Optoelektronik / Diodenlaser</i>	Dr. rer. nat. Götz Erbert Phone +49.30.6392-2656 goetz.erbart@fbh-berlin.de
Microwaves / Microwave Components & Systems <i>Mikrowellentechnik / Mikrowellenkomponenten &amp; -systeme</i>	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich Phone +49.30.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
GaN Optoelectronics <i>GaN-Optoelektronik</i>	Prof. Dr. rer. nat. Michael Kneissl Phone +49.30.6392-2812 michael.kneissl@fbh-berlin.de
GaN Electronics <i>GaN-Elektronik</i>	Dr.-Ing. Joachim Würfl Phone +49.30.6392-2690 joachim.wuerfl@fbh-berlin.de
Process Technology <i>Prozesstechnologie</i>	Dr. rer. nat. Olaf Krüger Phone +49.30.6392-3205 olaf.krueger@fbh-berlin.de
Materials Technology <i>Materialtechnologie</i>	Prof. Dr. rer. nat. Markus Weyers Phone +49.30.6392-2670 markus.weyers@fbh-berlin.de
Science Management <i>Wissenschaftsmanagement</i>	Nicolas Hübener, M.Sc., Dipl. Kfm. (FH) Phone +49.30.6392-3396 nicolas.huebener@fbh-berlin.de
Communications <i>Kommunikation</i>	Petra Immerz, M.A. Phone +49.30.6392-2626 petra.immerz@fbh-berlin.de



The Forschungsverbund Berlin e.V. comprises 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 preserving 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 belong to the Leibniz Association.

The institute directors and other senior scientists hold chairs at the Berlin/Brandenburg universities, thus ensuring close contact with teaching and research in higher education.

Forschungsverbund Berlin e.V.  
 Rudower Chaussee 17  
 12489 Berlin, Germany  
 Phone +49.30.6392-3330  
 Fax +49.30.6392-3333  
 Email urban@fv-berlin.de  
 Web www.fv-berlin.de

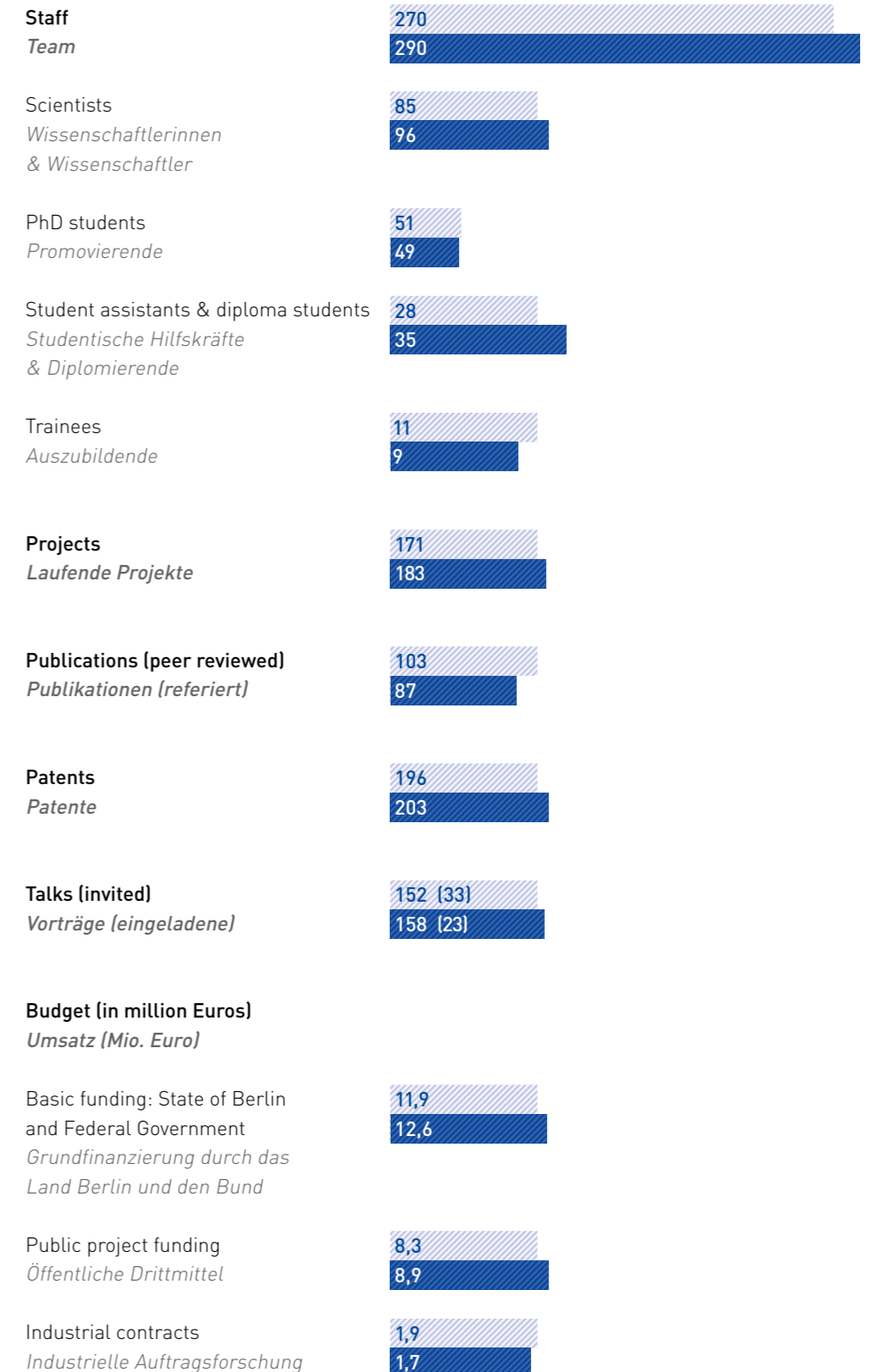
## Forschungsverbund Berlin e.V.

*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 Verbundverwaltung (Geschäftsführerin Dr. Manuela Urban) und gehören zur Leibniz-Gemeinschaft.*

*Die Direktoren der Institute und weitere leitende Wissenschaftler haben Professuren an den Universitäten in Berlin/Brandenburg inne und sichern so die enge Verbindung zu Lehre und Forschung in den Hochschulen.*

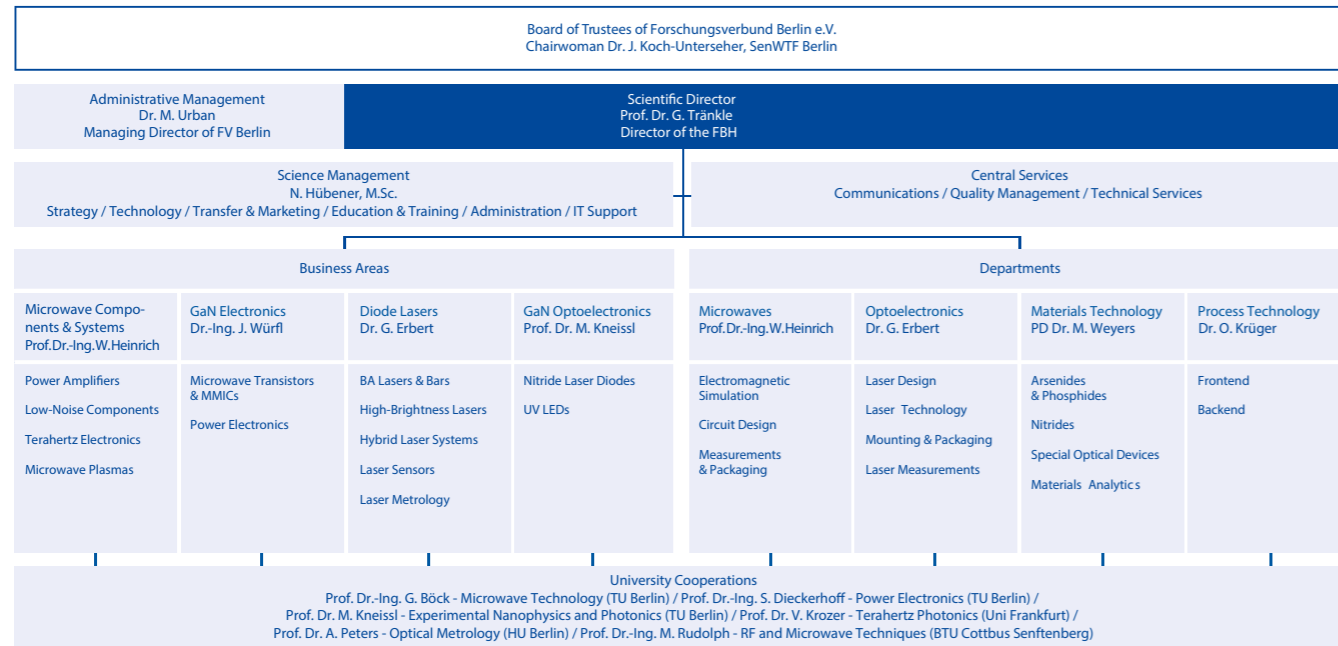
## The institute in figures Das Institut in Zahlen

Founded 1992  
Gegründet 1992



# Organizational chart

## Organigramm



## Scientific advisory board

### Wissenschaftlicher Beirat

#### Chair Vorsitz

Prof. Dr. Robert Weigel  
Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

#### Members Mitglieder

Dipl.-Ing. Bernd Adelseck  
Airbus Defence and Space, Ulm

Dr. Erich Auer  
Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG,  
Backnang

Dr. Frank van den Bogaart  
TNO Defence, Security and Safety,  
The Hague (NL)

Dr. Thomas Fehn  
Jenoptik AG, Jena

Prof. Dr. Claire Gmachl  
Princeton University, Princeton (USA)

Dr. Ulf Meiners  
United Monolithic Semiconductors GmbH,  
Ulm

Prof. Dr. Reinhart Poprawe M.A.  
Fraunhofer-ILT, Aachen

Dr.-Ing. Christian Schmitz  
TRUMPF Laser- & Systemtechnik GmbH,  
Ditzingen

Berry Smutny  
DELLOS Space GmbH, Frankfurt am Main

Dr. Uwe Strauss  
OSRAM Opto Semiconductors GmbH,  
Regensburg

Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker  
TU Berlin, Institut für Lichttechnik

Highlights  
Schlaglichter

## On the test stand – FBH's evaluation positive

A major occurrence has influenced events at the Ferdinand-Braun-Institut over the past year: the scheduled evaluation in June 2014 that recurs every seven years. During this process, the institution is examined from head to toe to evaluate whether the requirements for the financial support of a Leibniz institute continue to be met – i.e. having importance beyond its own region and scientific activities in the overall political interests of the nation.

The evaluation report of the independent experts has subsequently been completed and confirms the results for the institute as excellent to superior in all areas. The 13-member evaluation group was chaired by Prof. Manfred Bayer from Experimental Physics at TU Dortmund University. The report evaluates the achievements and progress of the institute over the past years and how persuasive the plans for the future are. On the basis of this report, the Senate of the Leibniz Association recommended in March 2015 the continued support of the Ferdinand-Braun-Institut to the federal and state governments under their funding program for associations.



← Expert group discussing with employees during the evaluation process – the event took place in the unfinished FBH extension building.

*Die Gutachtergruppe beim Gespräch mit Mitarbeitern während der Evaluierung – die Veranstaltung fand im Rohbau des FBH-Erweiterungsbaus statt.*

The FBH was pleased about the exceedingly positive evaluation, according to which the institute is considered one of the most internationally renowned research centers in the area of III-V semiconductor technology. The institute was considered to be impressively successful the past several years and even further elevated its already very high level of performance. According to the position paper, its excellent and internationally competitive work in the area of III-V semiconductor technology is up to date, and the application and transfer of the work is of great scientific, economic, and social importance. "This is a welcome confirmation of our plan and our results", explains Günther Tränkle, Director of the FBH, and moreover that "we will also continue to expand this direction through our excellent research results and comprehensive transfer activities in the future."

## Auf dem Prüfstand – FBH positiv evaluiert

Ein zentrales Ereignis prägte im vergangenen Jahr die Geschehnisse am Ferdinand-Braun-Institut: die turnusgemäß alle sieben Jahre anstehende Evaluierung im Juni 2014. Dabei wird die Einrichtung auf Herz und Nieren geprüft und bewertet, ob die Voraussetzungen der Förderung eines Leibniz-Instituts – überregionale Bedeutung und gesamtstaatliches wissenschaftspolitisches Interesse – weiterhin gegeben sind.

Inzwischen liegt der Bewertungsbericht der unabhängigen Expertinnen und Experten vor, der dem Institut sehr gute bis exzellente Ergebnisse in allen Bereichen bescheinigt. Den Vorsitz der international besetzten 13-köpfigen Gutachtergruppe führte Prof. Dr. Manfred Bayer von der Experimentalphysik der Technischen Universität Dortmund. Der Bericht bewertet die Leistungen und die Entwicklung des Instituts in den zurückliegenden Jahren und wie überzeugend die Planungen für die Zukunft sind. Auf dieser Basis hat der Senat der Leibniz-Gemeinschaft im März 2015 Bund und Ländern die weitere Förderung des Ferdinand-Braun-Instituts im Rahmen ihrer Gemeinschaftsfinanzierung empfohlen.

Das FBH zeigt sich erfreut über die überaus positive Bewertung, wonach das Institut international zu den renommiertesten Kompetenzzentren im Bereich der III/V-Halbleitertechnologie zähle. In den letzten Jahren sei es dem Institut eindrucksvoll gelungen, das bereits sehr hohe Leistungsniveau weiter zu steigern. Gemäß Stellungnahme seien seine exzellenten und international konkurrenzfähigen Arbeiten im Bereich der III/V-Halbleitertechnologie zeitgemäß und deren Anwendung und Transfer von hoher wissenschaftlicher, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Relevanz. „Dies ist eine erfreuliche Bestätigung unseres Konzepts und unserer Ergebnisse“, erklärt der Direktor des FBH Günther Tränkle, „diesen Weg mit unseren exzellenten Forschungsergebnissen und umfassenden Aktivitäten zum Transfer werden wir auch künftig weiter ausbauen.“

## Opening up new applications with UV LEDs

The most recent Nobel Prize for physics went to the Japanese researchers Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, and Shuji Nakamura, recognizing their achievements in developing blue LEDs. Their work is the foundation today for innumerable research projects in the area of LEDs and laser diodes worldwide. The FBH has also been involved for many years with the research, development, and application of these kinds of ultraviolet (UV) LEDs. These LEDs will be required for many applications in which heavy and toxic mercury vapor lamps are still employed today, for example. This includes processes in the printing and production technology as well as medical applications, such as for treating psoriasis.

The FBH emerged successful in the prestigious 2013 Zwanzig20 competition of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) with its 'Advanced UV for Life' program. 31 research institutions and industrial enterprises belong to the interdisciplinary consortium at present (for details, see p. 50). These partners constitute a complete value-added chain – from tailor-made semiconductor components to sub-assemblies and modules for devices through to systems-level applications. One of the priorities lies in the environment and life sciences area of applications being coordinated by the Leibniz Institute of Vegetable and Ornamental Crops (IGZ). In this program, the growth of health-promoting plant-based compounds for example will be selectively stimulated through irradiation with UV-B light.

The 'Advanced UV for Life' consortium headed by the FBH will be received support of up to 45 million Euros through 2019 and has already advanced through several rounds of support. The FBH was able to create an optimal technical environment for development of UV LEDs due to this program in addition to a strategic development process. An MOVPE epitaxy facility along with an automated LED wafer mapper and scribe/breaker for separating the chips are among the new acquisitions. These machines are essential for the component development project begun in 2014 under this program. Under the 'UV-B Efficiency' program, the FBH is developing efficient fabrication processes jointly with Technische Univer-



◀ First generation UV-LED module for plant illumination.  
UV-LED-Modul der ersten Generation für die Pflanzenbeleuchtung.

sität Berlin (TU Berlin) for UV-B LEDs (310 nm region) that have high quantum efficiency. The FBH and TU Berlin had already launched the 'Joint Lab GaN Optoelectronics' in order to tie together fundamental and applications-oriented aspects even more effectively for the development of UV LEDs and laser diodes based on gallium nitride (GaN).

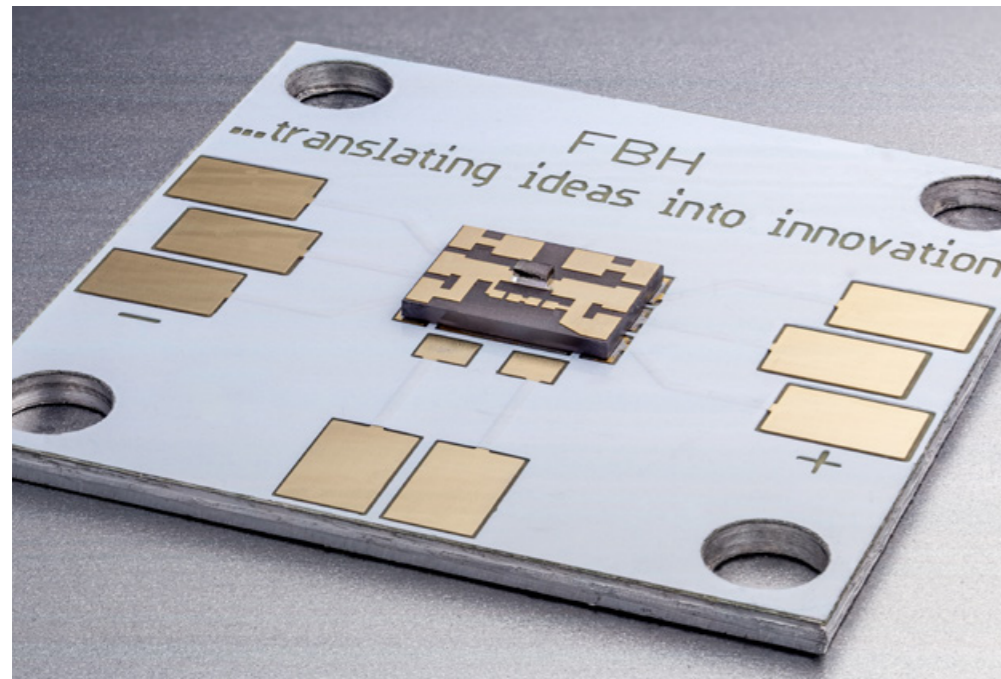
### Comprehensive research and development – from fundamental research to completed module

Several research efforts for specific emission wavelengths at the FBH are involved with UV LEDs: 360 – 365 nm for blood gas analysis, 300 – 320 nm for surface polymerization, phototherapy, and artificial illumination for plants, 260 – 280 nm for disinfection of water, and 210 – 320 nm for gas sensors. Very different technological approaches are required for fabrication of LEDs depending on the wavelength needed. For example, UV LEDs radiate at 365 nm through a semi-transparent p-junction and out the front side of the chip with an optical power of up to 0.3 mW at 10 mA. UV-B LEDs at 295 nm emit through the sapphire substrate and out the back side of the chip with an optical power of almost 0.7 mW at 20 mA and 13 mW at 400 mA. The main objectives of these efforts are to constantly increase the efficiency and operating life of the light-emitting diodes. Long-term stress tests of UV-B LEDs (300 nm) show a typical operating life currently of 10,000 hours before the optical power diminishes to about 50%. Accelerated aging tests at elevated temperatures are running at present. These will also investigate the influence of the atmosphere.

One of the current projects is Ultrasens, in which a novel LED-based platform for biochemical sensor technology, particularly for medical engineering, will be qualified. The FBH in cooperation with TU Berlin is developing the necessary light-emitting diodes for this project led by Bosch AG. This sensor platform is intended to be employed in the analysis of respiratory gases like carbon monoxide (NO) and ammonia (NH<sub>3</sub>). Suitable investigations facilitate non-invasive diagnosis and monitoring of respiratory passage diseases such as asthma and also of kidney and liver diseases. The solutions available today are labor-intensive and associated with high operating costs – so their employment is restricted to hospitals and specialist practices. A simple, cost-effective but at the same time precise system can therefore provide an important contribution to future individualized medicine. Besides employment in the medical field, the platform will also facilitate other avenues of application. These extend from monitoring of exhaust gases to reliable flame and fire detection. UV-C LEDs emitting at about 234 nm developed by the FBH have already been successfully employed for detecting carbon monoxide at ppm levels. That means concentrations can be detected with very high accuracy, because 1 ppm corresponds to one part per million of this gas by volume.

### Spin-off for UV LEDs in the offing – UVphotonics

UVphotonics, the newest research spin-off of the FBH, was launched in April 2014 and is being financed under the EXIST Research Transfer program. Tim Kolbe, Jens Raß, and Neysha Lobo-Ploch comprise the young start-up team aiming to develop, fabricate, and market commercially utilizable LEDs. They will be building on the research results from the 'Joint Lab GaN Optoelectronics' and initially will be specializing in UV-B LEDs in the spectral regime of 320 to 280 nm. Later on, the wavelengths will be expanded to the UV-C region. UVphotonics will offer processed wafers and chips to industrial customers that further integrate them. High optical power and long operating life are important specifications for these applications – ones that the UV-B LEDs from the spin-off already meet. The UVphotonics team is now working on improving the yields and increasing the homogeneity of the wafers. The spin-off is at the same time an important component flanking the activities of the 'Advanced UV for Life' program.



UV-B LED chip on ceramic submount.  
UV-B-LED-Chip auf Keramik-Submount.

## Mit UV-Leuchtdioden neue Anwendungen erschließen

Der letzte Nobelpreis für Physik ging an die Japaner Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura und zeichnete deren Errungenschaften bei der Entwicklung blauer Leuchtdioden (LEDs) aus. Ihre Arbeiten sind heute die Grundlage ungezählter Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Leucht- und Laserdioden weltweit. Auch das FBH beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Erforschung, Entwicklung und Applikation derartiger ultravioletter (UV) LEDs. Sie werden für viele Anwendungen benötigt, bei denen heute beispielsweise noch große, schwere und giftige Quecksilberdampflampen verwendet werden. Dazu gehören Verfahren in der Druck- und Produktionstechnologie ebenso wie medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Schuppenflechte.

2013 konnte sich das FBH im prestigeträchtigen Wettbewerb Zwanzig20 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit „Advanced UV for Life“ durchsetzen. 31 Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen gehören dem interdisziplinären Konsortium derzeit an (Details siehe auch S. 51). Diese Partner bilden die komplette Wertschöpfungskette ab – vom maßgeschneiderten Halbleiterbauelement über Baugruppen und Module für Geräte bis zur Anwendung in Systemen. Einer der Schwerpunkte liegt im Anwendungsbereich „Umwelt & Life Sciences“, der vom Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau koordiniert wird. Dabei soll durch Bestrahlung mit UV-B-Licht unter anderem das Wachstum gesundheitsfördernder Stoffe in Pflanzen gezielt angeregt werden.

Das vom FBH geleitete „Advanced UV for Life“-Konsortium wird bis 2019 mit bis zu 45 Millionen Euro gefördert und hat bereits mehrere Förderrunden erfolgreich absolviert. Dadurch konnte das FBH neben einem Strategieentwicklungsprozess optimale technische Bedingungen für die Entwicklung von UV-LEDs schaffen. Zu den Neuanschaffungen gehört eine MOVPE-Epitaxieanlage ebenso wie ein automatisierter LED-Wafermapper und ein Scriber/Breaker für die Vereinzelung der Chips. Diese Geräte sind essenziell für das erste in diesem Rahmen 2014 gestartete Projekt zur Bauelemententwicklung. In „UV-B Effizient“ entwickelt das FBH gemeinsam mit der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) effiziente Herstellungsprozesse für UV-B-LEDs (um 310 nm) mit hoher Quanteneffizienz. Bereits 2005 hatten das FBH und die TU Berlin das „Joint Lab GaN-Optoelektronik“ gestartet, um grundlagen- und anwendungsorientierte Aspekte bei der Entwicklung von UV-LEDs und Laserdioden auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) noch besser zu verbinden.

### Umfassende Forschung und Entwicklung – von den Grundlagen bis zum fertigen Modul

Mehrere Forschungsvorhaben mit ausgewählten Emissionswellenlängen beschäftigen sich am FBH mit UV-LEDs: 360 – 365 nm für die Blutgasanalyse, 300 – 320 nm für die Oberflächenpolymerisation, Fototherapie und die Pflanzenbeleuchtung, 260 – 280 nm für die Wasserdeseinfektion und 210 – 320 nm für die Gassensensorik. Je nach Wellenlänge sind sehr unterschiedliche technologische Ansätze bei der LED-Herstellung gefragt. So strahlen etwa UV-LEDs bei 365 nm durch einen semitransparenten p-Kontakt über die Chipvorderseite ab, mit optischen Leistungen bis zu 0,3 mW bei 10 mA. UV-B-LEDs bei 295 nm emittieren durch das Saphirsubstrat über die Chiprückseite mit optischen Leistungen von fast 0,7 mW bei 20 mA beziehungsweise 13 mW bei 400 mA. Übergreifende Ziele sind dabei stets, die Effizienz der Leuchtdioden und deren Lebensdauer zu erhöhen. Langzeitstresstests von UV-B-LEDs (ca. 300 nm) etwa zeigen nunmehr Lebensdauern von 10.000 Stunden, bevor die optische Leistung auf etwa 50% abfällt. Aktuell laufen beschleunigte Alterungstests bei höheren Temperaturen, hierbei wird auch der Einfluss der Atmosphäre untersucht.

Eines der laufenden Projekte ist „UltraSens“, bei dem eine neuartige LED-basierte Plattformtechnologie für die biochemische Sensorik, insbesondere in der Medizintechnik, qualifiziert werden soll. In dem von der Bosch AG geleiteten Projekt entwickelt das FBH in Zusammenarbeit mit der TU Berlin die benötigten Leuchtdioden. Diese Sensorikplattform soll unter anderem zur Analyse von Atemgasen wie Stickstoffmonoxid (NO) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) eingesetzt werden. Entsprechende Untersuchungen ermöglichen die nicht-invasive Diagnose und Überwachung von Atemwegserkrankungen wie etwa Asthma oder auch von Nieren- und Lebererkrankungen. Die heute verfügbaren Lösungen sind aufwändig und mit hohen Systemkosten verbunden – ihr Einsatz ist daher auf Kliniken und Facharztpraxen beschränkt. Ein einfacheres, kostengünstigeres aber gleichzeitig präzises System kann damit einen wichtigen Beitrag für eine künftige individualisierte Medizin liefern. Neben dem medizinischen Einsatz soll die Plattform aber auch weitere Anwendungen ermöglichen. Diese reichen von der Abgaskontrolle und Abgasüberwachung bis hin zu zuverlässigen Brandmeldern. Die durch das FBH entwickelten UV-C-LEDs mit Emission bei etwa 234 nm wurden bereits erfolgreich zum Nachweis von Stickstoffmonoxid im ppm-Bereich eingesetzt. Das bedeutet, dass sich die Konzentration mit höchster Genauigkeit nachweisen lässt, denn 1 ppm entspricht einem Volumenanteil dieses Gases pro Million.



### Ausgründung zu UV-LEDs in Vorbereitung – UVphotonics

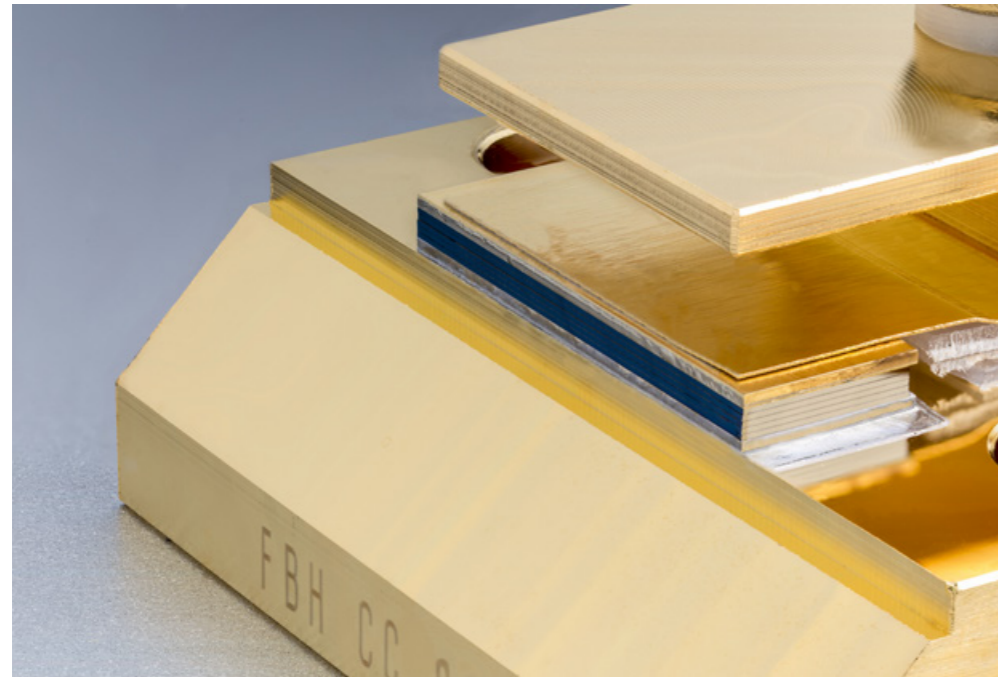
Im April 2014 ist das jüngste Ausgründungsvorhaben des FBH gestartet: UVphotonics, das im Rahmen von EXIST-Forschungstransfer finanziert wird. Tim Kolbe, Jens Raß und Neysha Lobo-Ploch bilden das junge Gründungsteam, das kommerziell verwertbare LEDs entwickeln, herstellen und vermarkten will. Dabei bauen sie auf den Forschungsergebnissen aus dem „Joint Lab GaN-Optoelektronik“ auf und spezialisieren sich zunächst auf UV-B-LEDs im Spektralbereich von 320 nm bis 280 nm. Später sollen die Wellenlängen in den UV-C-Bereich ausgedehnt werden. UVphotonics wird prozessierte Wafer und Chips für weiterverarbeitende Industriekunden anbieten. Wichtig sind dafür eine hohe Lichtleistung und lange Lebensdauer – Parameter, die die UV-B-LEDs des Spin-offs bereits erfüllen. Das Team von UVphotonics arbeitet nun daran, die Homogenität der Wafer und die Ausbeute weiter zu erhöhen. Die Ausgründung ist zugleich ein wichtiger Baustein, der die Aktivitäten von „Advanced UV for Life“ flankiert.

## Diode laser diversity – from high performance and narrow spectral linewidths to new colors

The FBH is one of the leading institutions in diode laser R&D globally. It covers off the entire value-added chain, from design through fabrication to assembled diode lasers. Complex modules containing laser diodes, optics, and crystals are also being increasingly built that are selectively developed to meet specific requirements of partners from research and industry. Regardless of whether they are high power, especially robust in construction, or pulsed beam sources, the requirements are just as diverse as the applications. The fields of application include materials processing, high-power laser systems, medical engineering, sensor technology, spectroscopy, and metrology.

### Midget power

Besides narrow spectral linewidth and high reliability, power, efficiency, and quality of the beam are the decisive parameters in high-power diode lasers. The FBH is therefore constantly working on improving the performance of these diode lasers. Just recently, a new record for brilliance was set for broad-area lasers: 7 watts output power at 1.5 mm-mrad from a single emitter with a conversion efficiency of 52%. This value could be achieved thanks to optimized lateral confinement and improved vertical epitaxial layers. These diode lasers were developed under project BRIDLE funded by the EU. The objective was to attain as high a brilliance as possible in order to directly employ diode lasers in systems for material processing.



High-density laser stack from the FBH, optimized for high output powers.

High-Density-Laserstack aus dem FBH, der für hohe Ausgangsleistungen optimiert ist.

Optimizations in single emitters consistently lead to improvements in laser bars as well. They are required for applications that demand high output power, such as pump lasers or for direct material processing, for instance. The output power from several broad-area lasers are merged to accomplish this. Even more powerful systems can be constructed using laser stacks, whereby several laser bars are stacked horizontally or vertically. This permits the total output power to be scaled up to the kilowatt region. A peak value of 1.9 kW per 1 cm laser bar at an operating temperature of 203 Kelvin (= -70° Celsius) was achieved in project CryoLaser through design adjustments and novel assembly techniques during the past year. The objective of this project is to develop novel diode laser technologies for large-scale laser facilities including laser-induced fusion systems. These kinds of systems are intended to be clean, safe, and highly efficient energy sources in the future and be employed in pure research.

An additional high-power application is a short-pulse laser system for which the FBH has developed the physical and technological foundations jointly with the Max Born Institute (MBI). The overall system, designed by MBI, provides pulse energies of approximately 1 J for 100 ps pulse durations and an average power of 200 W – being the international record. As a result, it joins the elite group in the global competition currently producing high-power laser systems. The FBH is developing the novel pump modules needed for this, which attain a peak power of 6 kW with pulse widths of 1 ms at repetition rates of 200 Hz. Tailored laser chips and optics are being used by the FBH for construction. In particular, a novel, especially elegant assembly technique has been developed. This is accomplished with only a few components as well as a robust and tolerant optical adjustment. The approach permits systems to be constructed faster, more simply, and more cost-effectively. The project, funded by EFRE, received a positive evaluation in September. Continuation of this work in a research center for pump laser diodes at the FBH is planned over the medium term, thus meeting the growing demand for these kinds of systems.

## Diodenlaservielfalt – von hohen Leistungen, schmaler Linienbreite bis hin zu neuen Farben

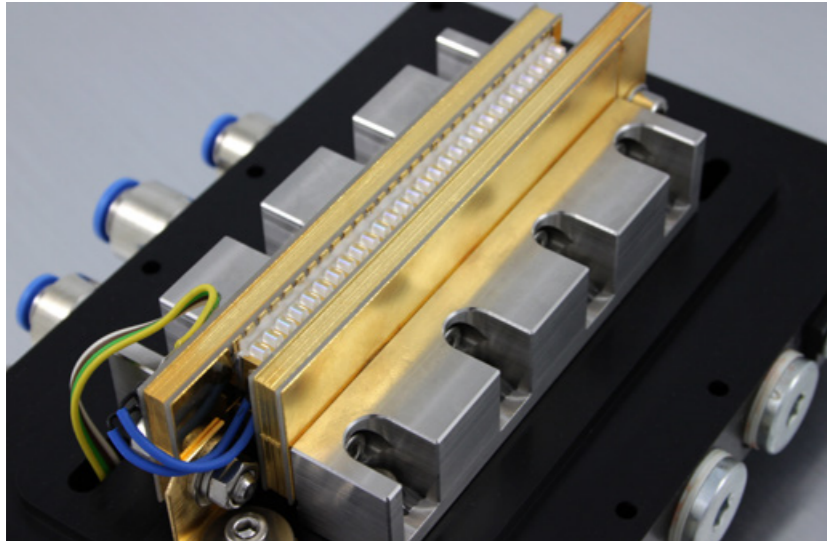
Das FBH ist eine der weltweit führenden Einrichtungen bei der Erforschung und Entwicklung von Diodenlasern. Es deckt die komplette Wertschöpfungskette ab, vom Design über die Prozessierung bis zum fertigen Diodenlaser. Immer häufiger werden auch komplexe Module mit Laserdioden, Optiken und Kristallen aufgebaut, die gezielt auf die spezifischen Erfordernisse von Partnern aus Forschung und Industrie hin entwickelt werden. Egal ob hohe Leistungen, ein besonders robuster Aufbau oder gepulste Strahlquellen, die Anforderungen sind ebenso vielfältig wie die Applikationen. Zu den Anwendungsfeldern gehören unter anderem die Materialbearbeitung, Hochleistungs-Lasersysteme, Medizintechnik, Sensorik, Spektroskopie und Metrologie.

### Winzlinge mit Power

Leistung, Effizienz und Strahlqualität sind neben einer schmalen Linienbreite und hohen Zuverlässigkeit die entscheidenden Parameter bei Hochleistungs-Diodenlasern. Das FBH arbeitet daher an der stetigen Verbesserung der Leistungsfähigkeit dieser Diodenlaser. Erst kürzlich wurde ein neuer Bestwert für die Brillanz bei Breitstreifenlasern erreicht: 7 Watt Ausgangsleistung bei 1,5 mm-mrad aus einem Einzelemitter mit einem Konversionswirkungsgrad von 52 %. Dieser Wert konnte dank einer optimierten lateralen Wellenführung und einer verbesserten vertikalen Schichtstruktur erreicht werden. Diese Diodenlaser wurden im Rahmen des EU-geförderten Projektes BRIDLE entwickelt. Ziel war es, eine größtmögliche Brillanz zu erreichen, um Diodenlaser künftig direkt in Systemen zur Materialbearbeitung einzusetzen.

Optimierungen bei Einzelemittern führen stets auch zu Verbesserungen bei Laserbarren. Sie werden für Anwendungen benötigt, die hohe Ausgangsleistungen erfordern, wie etwa bei Pump Lasern oder in der direkten Materialbearbeitung. Dabei wird die Leistung aus mehreren Breitstreifenlasern miteinander kombiniert. Noch leistungsfähigere Systeme können mit Laserstacks aufgebaut werden, bei denen mehrere Barren horizontal oder vertikal gestapelt werden. Damit lässt sich die Gesamtleistung bis in den Kilowatt-Bereich skalieren. Im vergangenen Jahr konnte hier durch Designanpassungen und neuartige Montagetechniken im Projekt „CryoLaser“ ein Spitzenwert von 1,9 kW pro 1 cm Barren bei einer Betriebstemperatur von 203 Kelvin (= -70° Celsius) erreicht werden. Ziel dieses Projektes ist es, eine neuartige Diodenlasertechnologie für Großlaseranlagen bis hin zu laserinduzierten Fusionssystemen zu entwickeln. Derartige Systeme sollen künftig als saubere, sichere und hocheffiziente Energiequellen und in der Grundlagenforschung eingesetzt werden.

Eine weitere Hochleistungsanwendung ist ein Kurzpuls Lasersystem, bei dem das FBH gemeinsam mit dem Max-Born-Institut (MBI) die physikalischen und technologischen Grundlagen entwickelt hat. Das vom MBI konzipierte Gesamtsystem liefert Impulsenergien



Two of these high-power laser bar modules form a pump module for an X-ray laser system with up to 6 kW peak power.

Zwei dieser Hochleistungs-Barrenmodule bilden ein Pumpmodul für ein Röntgenlasersystem mit bis zu 6 kW Spitzenleistung.

von circa 1 J bei 100 ps Impulsdauer und einer mittleren Leistung von 200 W – und somit internationale Bestwerte. Damit reiht es sich in die Spitzengruppe im weltweiten Wettbewerb derzeit entstehender Hochleistungslasersysteme ein. Das FBH entwickelt die dafür notwendigen, neuartigen Pumpmodule, die 6 kW Spitzenleistung mit Impulsbreiten von 1 ms bei Folgefrequenzen von 200 Hz erreichen. Zum Aufbau nutzt das FBH maßgeschneiderte Laserchips und Optiken. Insbesondere wurde eine neuartige, besonders elegante Montage-technik entwickelt. Diese kommt mit nur wenigen Bauelementen sowie einer robusten und toleranten optischen Justage aus. Damit lassen sich die Systeme einfacher, schneller und auch kostengünstiger aufbauen. Im September wurde das EFRE-geförderte Projekt erfolgreich evaluiert. Mittelfristig ist geplant, diese Arbeiten in einem Forschungszentrum für Pumpdioden am FBH weiterzuführen. Damit soll der wachsende Bedarf an derartigen Systemen besser bedient werden.

## Control of laser light – new colors and extremely high precision

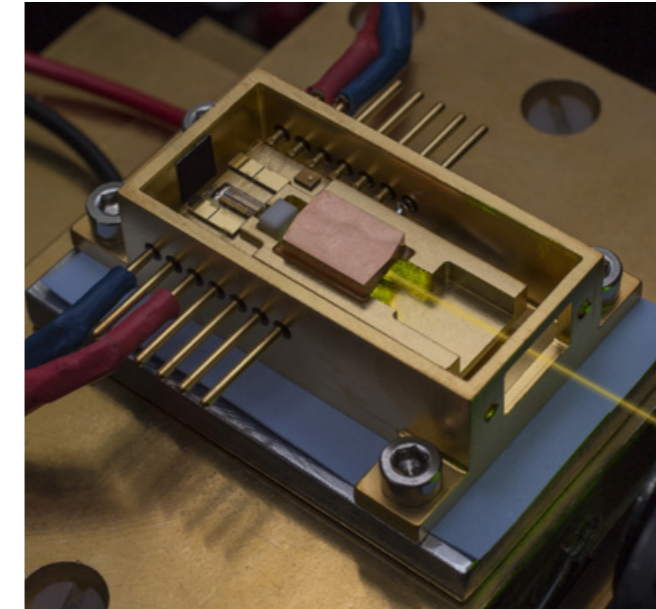
The demands made on modern optical tools are rising. Besides continually higher output power and beam quality, laser emission sources with specific colors or specialized beam properties are increasingly in demand. This applies particularly to applications that were not amenable to or whose minimum requirements could not be met by semiconductor lasers up to now. These include narrow-band lasers for optical data transmission as well as laser modules that emit in the yellow region of the spectrum. Semiconductor-based lasers offer decisive advantages in these cases. They can be tailored for diverse requirements and are exceedingly compact. That makes them highly attractive for mobile applications. This is accompanied by clever developments with which the laser light can be controlled even better.

### YELLOW – yellow laser emission sources for mobile analysis

The FBH is developing compact laser modules with high efficiency under the YELLOW InnoProfile Transfer initiative. These can excite substances in the yellow wavelength region of 550 – 590 nm. These modules are realized by doubling the frequency of infrared radiation from highly brilliant laser diodes in the region of 1100 – 1180 nm. In combination with micro-optics, construction can be accomplished with very small component dimensions – just a few centimeters for edge lengths.

These kinds of lasers should provide even higher optical resolution for environmental measurements, as one example, and be able to be employed easily on site. Thanks to project YELLOW, several beam sources can be replaced by a single, electrically tunable laser module. This should permit continuous wave operation with highly stable output power and also modulation frequencies of about 10 MHz, as well as short optical pulses as are required in time-resolved fluorescence spectroscopy, for instance. Various resonator geometries

were therefore developed and successfully tested in the project for these different modes of operation. Currently, a sealed housing with optical fiber port and integrated active control is being developed that will enable the laser module to be used beyond the laboratory as well. Thanks to these developments carried out under the project, the FBH laser sources are ideally suited for mobile applications in biomedicine and environmental analysis.



Compact diode laser module emitting in the yellow wavelength region for use in mobile environmental analytics.

Kompaktes, gelb-emittierendes Diodenlasermodul zum Einsatz in der mobilen Umweltanalytik.

### Narrow-band lasers – greatest precision and reliability

Semiconductor lasers featuring a narrow spectral linewidth are becoming increasingly attractive for scientific and industrial applications. Narrow-band means the more narrow the wavelength region in which the laser emits, the higher its spectral resolution and hence its precision is. Spectral resolution of up to 11 decimal places is being attained at the FBH. This property is utilized for coherent communications in free space, for example, in which high data rates are achieved using optical beams for transmission between satellites, aircraft, drones, for earth downlinks, or between ground stations. Additional applications lie in the fields of disaster management and traffic monitoring. These kinds of lasers are suitable for aerospace applications due to their small size and low weight, as well as their large modulation bandwidth and high output power with low power consumption. As an example, they are used for atomic interferometry to determine fundamental physical constants like the gravitational constant with very high accuracy. Gravity waves as well are to be investigated with them in future.

Advances from the FBH are also contributing to further improvements in the spectral properties in order to open up these kinds of applications for semiconductor lasers. For example, the spectral bandwidth can be reduced through resonant optical feedback using an external optical element such as a Bragg grating (extended cavity diode laser, ECDL). In addition, the FBH has been successful in sharply reducing the spectral linewidth of the laser even further using external monolithic Fabry-Pérot resonators. If the frequency of the free-running laser corresponds to a resonance of the external resonator, the light from the resonator is injected back into the laser. This couples the laser frequency to the resonant frequency of the external resonator. The power spectral density of the frequency noise for a 1.5 mm distributed-feedback laser (DFB) is reduced more than five orders of magnitude by this approach.

The means of precisely controlling the power spectral density of the frequency noise for diode lasers is a prerequisite for developing lasers with stable frequencies. There have been various methods that were all of only limited use up to now. For that reason, a procedure for determining the frequency noise spectra of free-running diode lasers that is simple to apply was developed at the FBH. It is based on measurement of the beat note signal between two lasers. After comprehensive simulations, an algorithm was developed and tested. The beat note signal is digitized and mixed down to the complex baseband. Then the phase as a function of time is determined and finally a suitable filter and Fourier transform applied. In this way, phase noise spectra can be determined with free-running lasers, from which the frequency noise spectra are directly obtained.



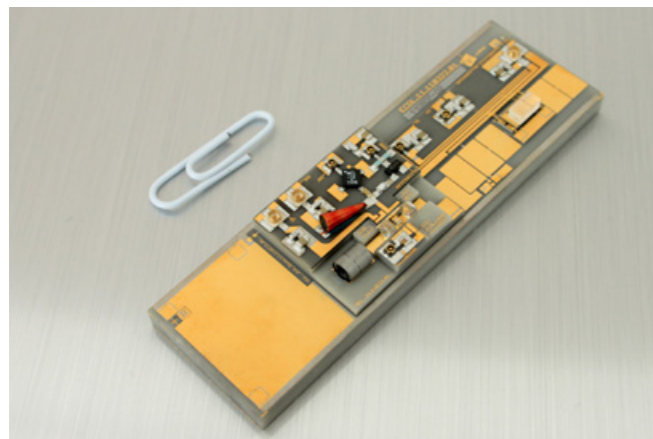
## Kontrolle des Laserlichts – neue Farben und höchste Präzision

Die Anforderungen an moderne Lichtwerkzeuge steigen. Neben immer höherer Ausgangsleistung und Strahlqualität, werden Laserstrahlquellen zunehmend nachgefragt, die spezifische Farben oder spezielle Strahleigenschaften bieten. Das betrifft insbesondere Anwendungen, die bislang mit Halbleiterlasern nicht oder nicht mit den erforderlichen Spezifikationen zugänglich waren. Dazu gehören sowohl schmalbandige Laser für die optische Datenübertragung als auch Lasermodule, die im gelben Spektralbereich emittieren. Halbleiterbasierte Laser bieten dabei entscheidende Vorteile: Sie lassen sich auf vielfältige Erfordernisse hin maßschneidern und sind überaus kompakt. Das macht sie für mobile Anwendungen hochattraktiv. Damit einhergehen ausgeklügelte Entwicklungen, mit denen sich das Laserlicht immer besser kontrollieren lässt.

### YELLOW – gelbe Laserlichtquellen für die mobile Analytik

Das FBH entwickelt im Rahmen der InnoProfile-Transfer-Initiative YELLOW kompakte Lasermodule mit hoher Effizienz, die Substanzen im gelben Wellenlängenbereich bei 550 nm bis 590 nm anregen. Realisiert werden diese Module mithilfe der Frequenzverdoppelung von infraroter Strahlung aus hochbrillanten Laserdioden im Bereich von 1100 nm bis 1180 nm. In Kombination mit Mikrooptiken, erlaubt der Aufbau geringe Baugrößen von nur wenigen Zentimetern Kantenlänge.

Derartige Laser sollen beispielsweise bei umweltanalytischen Messungen für eine noch höhere optische Auflösung sorgen und flexibel vor Ort einsetzbar sein. Dank YELLOW können zudem mehrere Strahlquellen durch ein einziges elektrisch durchstimmbares Modul ersetzt werden. Damit sollen sowohl der Dauerstrichbetrieb mit hochstabilen Ausgangsleistungen und Modulationsfrequenzen von etwa 10 MHz möglich sein als auch kurze optische Pulse, wie sie etwa in der zeitaufgelösten Fluoreszenzspektroskopie benötigt werden. Daher wurden im Projekt verschiedene Resonatorgeometrien für diese unterschiedlichen Betriebsmodi entwickelt und erfolgreich getestet. Aktuell werden ein geschlossenes Gehäuse mit Faserausgang und eine integrierte aktive Regelung entwickelt, die dafür sorgen, dass das Lasermodul auch außerhalb des Labors genutzt werden kann. Dank dieser im Projekt durchgeführten Entwicklungen sind die FBH-Laserquellen ideal für mobile Anwendungen in der Biomedizin und der Umweltanalytik geeignet.

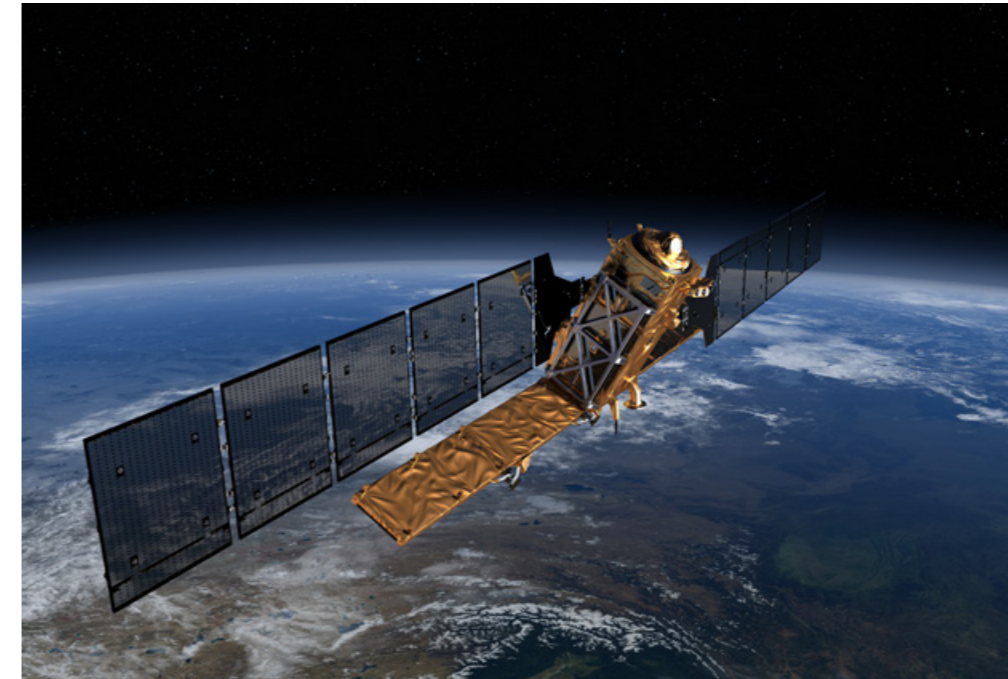


◀ Micro-integrated extended cavity diode laser for space applications. Mikrointegrierter Extended Cavity Diode Laser für Weltraumanwendungen.

### Schmalbandige Laser – allerhöchste Präzision und Zuverlässigkeit

Spektral schmalbandige Halbleiterlaser werden für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen immer attraktiver. Schmalbandig bedeutet: je enger der Wellenlängenbereich, in dem der Laser abstrahlt, umso höher ist die spektrale Auflösung und damit seine Präzision. Am FBH wird hierbei eine spektrale Auflösung mit bis zu 11 Stellen hinter dem Komma erreicht. Diese Eigenschaft wird beispielsweise in der kohärenten Freiraumkommunikation genutzt, bei der hohe Datenraten mittels Licht zwischen Satelliten, Flugzeugen und Drohnen, zur Erde oder über bodennahe Verbindungen übertragen werden. Weitere Anwendungen

liegen im Katastrophenschutz und bei der Verkehrsüberwachung. Im Weltraum punkten derartige Halbleiterlaser durch geringe Größe und geringes Gewicht sowie durch eine große Modulationsbandbreite und hohe Ausgangsleistungen bei geringem Leistungsverbrauch. Hier werden sie zur Atominterferometrie genutzt, bei der fundamentale physikalische Konstanten wie die Gravitationskonstante mit höchster Genauigkeit ermittelt werden können. Auch Gravitationswellen sollen so künftig untersucht werden.



◀ The Sentinel-1 satellite for Earth observation is equipped with space-qualified laser diode benches from the FBH.

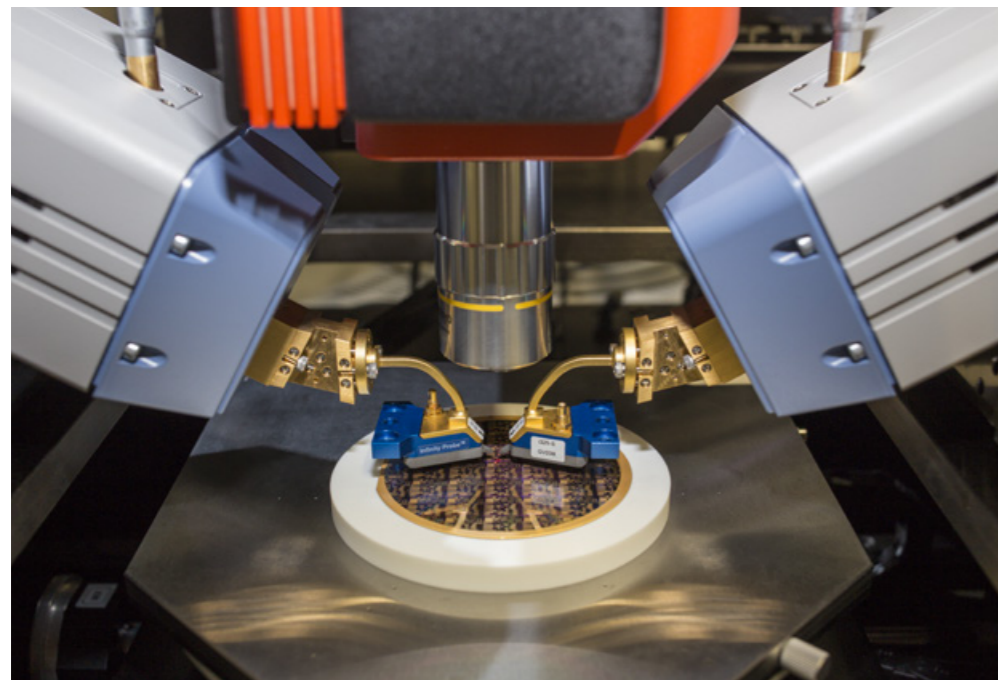
Der Sentinel-1-Satellit zur Erdüberwachung ist mit weltraumtauglichen Laserdioden-Benches des FBH ausgestattet.

Entwicklungen aus dem FBH tragen dazu bei, die spektralen Eigenschaften weiter zu verbessern, um derartige Applikationen für Halbleiterlaser zu erschließen. Die spektrale Bandbreite kann mittels optischer Rückkopplung durch ein externes optisches Element, wie etwa ein Bragg-Gitter, verringert werden (Extended Cavity Diode Laser – ECDL). Durch externe monolithische Fabry-Pérot-Resonatoren ist es dem FBH gelungen, die Linienbreite des Lasers nochmals stark zu reduzieren. Wenn die Frequenz des freilaufenden Lasers einer Resonanz des externen Resonators entspricht, wird Licht aus dem Resonator zurück in den Laser injiziert. Dabei koppelt sich die Laserfrequenz an die Resonanzfrequenz des externen Resonators. Die spektrale Leistungsdichte des Frequenzrauschens eines 1,5 mm langen DFB-Lasers wird dadurch um mehr als fünf Größenordnungen reduziert.

Die Möglichkeit, die spektrale Leistungsdichte des Frequenzrauschens von Diodenlasern präzise bestimmen zu können, ist eine Voraussetzung für die Entwicklung frequenzstabiler Laser. Bislang gab es verschiedene Methoden, die alle nur begrenzt nutzbar sind. Am FBH wurde daher ein einfach anzuwendendes Verfahren zur Bestimmung von Frequenzrauschspektren freilaufender Diodenlaser entwickelt. Es basiert auf der Schwebungsmessung zwischen zwei Lasern. Nach umfassenden Simulationen wurde ein Algorithmus entwickelt und getestet: Das Schwebungssignal wird dazu digitalisiert und ins komplexe Basisband heruntergemischt. Anschließend wird die Phase als Funktion der Zeit ermittelt und dann eine geeignete Filterung und Fourier-Transformation angewandt. Auf diese Weise lassen sich mit freilaufenden Lasern Phasenrauschspektren ermitteln, aus denen sich direkt die Frequenzrauschspektren ergeben.

## Terahertz electronics – further progress toward applications

Faster, higher, more powerful, and continually more refined! What is true for sports also applies to electronics. Our demands for ever-faster communication, more powerful image processing, and complex, adaptive circuitry and systems drive the developments in this field. The FBH possesses the necessary semiconductor technologies, complex system-on-chip designs and technical equipment capable of measurements at the highest frequencies. The FBH has built up its research portfolio over the past years on this foundation in its push toward terahertz frequencies (THz). The FBH fabrication processes attain cut-off frequencies of about 350 GHz and are currently being extended toward 700 GHz. The objective of these activities is to bridge the gap between research oriented toward fundamental understanding and applications-driven demand for technologically mature and stable solutions throughout a dependable supply chain. An important component of this is the Joint Lab with Goethe University Frankfurt. Various activities in the area of detection and emission at THz frequencies using GaN-HEMTs are underway in this program. Plasmonic effects that enable electronic components to be operated above the transition frequency ( $f_T$ ) are also being studied.



◀ On-wafer measurement setup for terahertz frequencies.

On-Wafer-Messplatz für Terahertz-Frequenzen.

### SciFab – monolithic-integrated foundry process for millimeter-wave applications

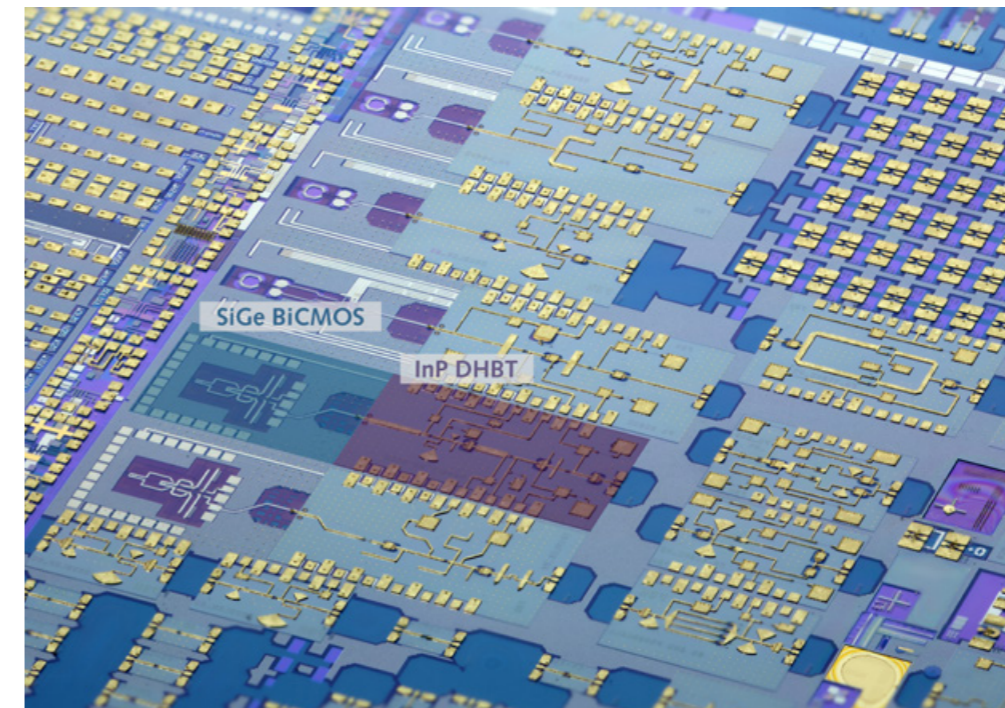
The FBH successfully collaborates in the field of THz electronics with numerous partners from research and industry, including Innovations for High-Performance Microelectronics (IHP), an institute of the Leibniz Association. Two different worlds of technology are united at wafer level in this collaboration: highly complex BiCMOS technology (IHP) with high-power InP-DHBT technology (FBH). External customers have had access to SciFab foundry service since 2014. The SciFab technology is ideally suited for control circuitry in fiber-optic broadband communications at the highest data rates. Integration at wafer level enables size, weight, and excess heat to be reduced in comparison with conventional assembly techniques. The combined technology comprises high-power InP-DHBT components with  $f_T$  &  $f_{max}$  above 320 GHz at 20 mA collector current and  $BV_{CEO} = 4$  V breakdown voltage.

## Terahertz-Elektronik – weitere Schritte in Richtung Applikation

Schneller, höher, leistungsstärker und immer ausgefeilter! Was im Sport gilt, trifft auch für die Elektronik zu. Unsere Anforderungen nach immer schnellerer Kommunikation, leistungsfähigen bildgebenden Verfahren und komplexen, anpassungsfähigen Schaltungen und Systemen treiben die Entwicklungen in diesem Bereich voran. Das FBH verfügt über die notwendigen Halbleitertechnologien, komplexe System-on-Chip-Konzepte und eine technische Ausrüstung, die Messungen bei höchsten Frequenzen ermöglicht. Auf dieser Grundlage hat das FBH in den letzten Jahren seine Forschungsarbeiten in Richtung der Terahertz-Frequenzen (THz) ausgebaut: Die FBH-Prozesse erreichen Grenzfrequenzen von etwa 350 GHz und werden aktuell in Richtung 700 GHz weiterentwickelt. Mit diesen Aktivitäten zielt es auf einen Brückenschlag zwischen grundlagenorientierter Forschung und anwendungsgetriebener Nachfrage nach ausgereiften und stabilen Lösungen entlang einer verlässlichen Lieferkette. Ein wesentlicher Bestandteil ist hierbei das Joint Lab mit der Goethe-Universität Frankfurt am Main. In diesem Rahmen laufen verschiedene Aktivitäten auf dem Gebiet der Detektion und Emission bei THz-Frequenzen mithilfe von GaN-HEMTs. Auch plasmonische Effekte werden dabei untersucht, die es ermöglichen, elektronische Bauelemente oberhalb der Transitfrequenz ( $f_T$ ) zu betreiben.

### SciFab – monolithisch-integrierter Foundry-Prozess für Millimeterwellen-Anwendungen

Das FBH kooperiert im Bereich der THz-Elektronik erfolgreich mit zahlreichen Partnern aus Forschung und Industrie, u.a. mit dem Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP). Im Rahmen dieser Kooperation werden zwei Technologiewelten auf Wafer Ebene vereint: die hochkomplexe BiCMOS (IHP) Technologie mit der Hochleistungs-InP-DHBT-Technologie (FBH). Externen Kunden ist dieses Angebot seit 2014 als SciFab Foundry-Service zugänglich. Die SciFab-Technologie eignet sich ideal für die Ansteuerungselektronik für die breitbandige Kommunikation mit höchsten Datenraten in Glasfasernetzen. Durch die Integration auf Wafer Ebene lassen sich – verglichen mit herkömmlichen Aufbautechniken – Größe, Gewicht und die abzuführende Wärme reduzieren. Die kombinierte Technologie umfasst Hochleistungs-InP-DHBT-Bauteile mit  $f_T$  &  $f_{max}$  über 320 GHz bei 20 mA Kollektorstrom und  $BV_{CEO} = 4$  V Durchbruchspannung.



◀ Fully processed SciFab wafer with InP-on-BiCMOS chips.

Prozessierter SciFab-Wafer mit InP-on-BiCMOS-Chips.

## Power electronics – efficient GaN power switches & a new Joint Lab

The FBH has been able to expand its activities in the area of GaN power electronics over the past years. One important component is the EU HiPoSwitch project coordinated by the Ferdinand-Braun-Institut that deals with novel GaN transistors. These devices should offer smaller volume and lower weight while providing higher power handling capability in power converter systems in the future. The goal is energy-efficient, compact, and high-performance electronic power converters for a range of applications, from communications technology to conversion of solar energy. Enhancement-mode (normally-off) GaN power transistors with a blocking voltage of over 600 V, 75 mΩ on-state resistance, and excellent switching characteristics have been reproducibly fabricated successfully in this project. FBH stands at the forefront of global activity in this area as a result of these performance figures, with commensurately strong levels of international interest.



← GaN-based half bridge for inverters  
GaN-basierte Halbbrücke für Wechselrichter.

The 'Joint Lab Power Electronics', a collaboration between the FBH and the Institute of Energy and Automation Technology (TU Berlin), has been initiated to build on this position. This collaboration with TU Berlin is another example of how FBH is bridging the gap between fundamental understanding and applications-oriented research. FBH's now fifth Joint Lab provides the interface between GaN semiconductor technology and high-efficiency power conversion systems. Specialized switching converters will be developed that best utilize the outstanding advantages of GaN power transistors but that also demonstrate what the possible limitations of this technology are through a benchmarking study. A GaN-based full bridge inverter with an output power of 4 kW and over 97 % efficiency is the objective in the medium term. FBH will be looking after the component design, processing, assembly, and the reliability studies. The priority for TU Berlin in the collaboration lies in developing and implementing the system architecture including the measurement technology.

## Leistungselektronik – effiziente GaN-Leistungsschalter & neues Joint Lab

Im Bereich der GaN-Leistungselektronik konnte das FBH seine Aktivitäten in den letzten Jahren erfolgreich ausbauen. Ein wichtiger Baustein ist das vom Ferdinand-Braun-Institut koordinierte EU-Projekt HiPoSwitch, das sich mit neuartigen GaN-Transistoren beschäftigt. Diese sollen bei künftigen Leistungskonvertersystemen für weniger Volumen und Gewicht bei gleichzeitig höherer Leistungsfähigkeit sorgen. Angestrebt sind energieeffiziente, kompakte und leistungsfähige elektronische Energiekonverter für eine Fülle von Anwendungen – von der Kommunikationstechnik bis hin zur Umwandlung von Solarenergie. In diesem Rahmen ist es gelungen, selbstsperrende GaN-Leistungstransistoren mit über 600 V Sperrspannung,

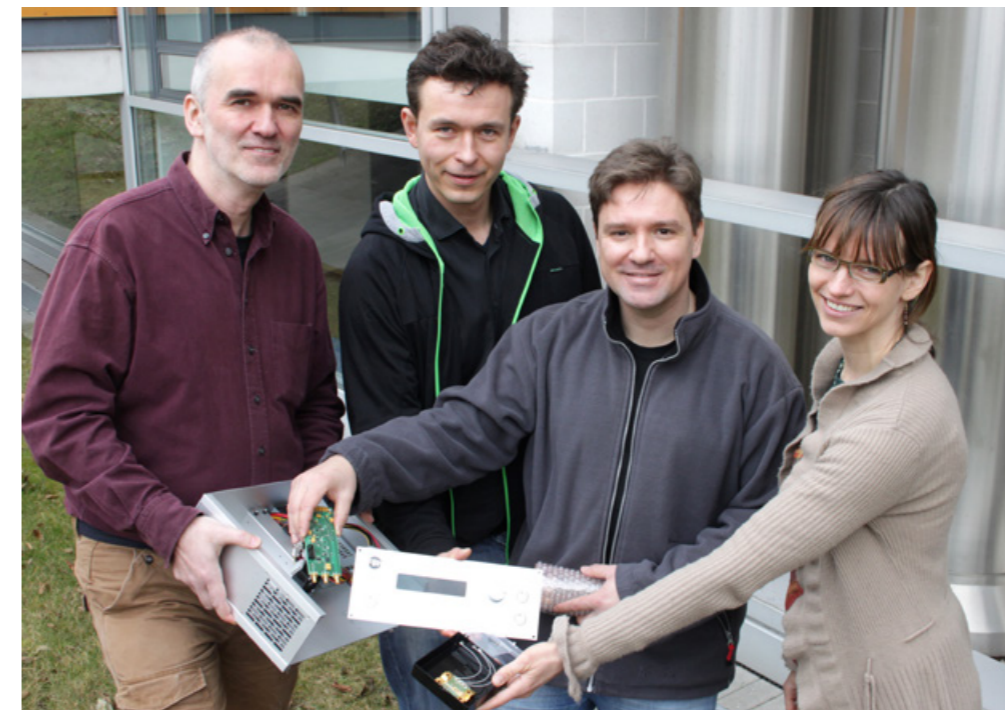
75 mΩ Einschaltwiderständen und sehr guten Schalteigenschaften reproduzierbar zu realisieren. Mit diesen Werten steht das FBH an vorderster Front der weltweiten Aktivitäten auf diesem Gebiet, entsprechend stark ist auch die internationale Resonanz.

Um diese Position weiter auszubauen, wurde das „Joint Lab Leistungselektronik“ initiiert, eine Kooperation zwischen dem FBH und dem Institut für Energie- und Automatisierungstechnik der TU Berlin. Auch mit dieser Hochschulkooperation schlägt das FBH die Brücke zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung. Das nunmehr fünfte Joint Lab des FBH bildet die Schnittstelle zwischen der GaN-Halbleitertechnologie und hocheffizienten Energiewandlersystemen. Spezielle Konverterschaltungen sollen dabei entwickelt werden, die das hervorragende Potenzial von GaN-Leistungstransistoren optimal nutzen, in einem Benchmarking-Prozess aber auch mögliche Grenzen dieser Technologie aufzeigen. Mittelfristiges Ziel ist ein GaN-basierter Vollbrückeninverter mit einer Leistung von 4 kW und einer Effizienz von über 97 %. Das FBH wird sich um das Bauelementdesign, die Prozessierung, den Aufbau und Zuverlässigkeitsuntersuchungen kümmern. Der Schwerpunkt der TU Berlin in der Zusammenarbeit liegt auf der Entwicklung und Realisierung der Systemarchitektur inklusive Messtechnik.

## Turning R&D results into prototypes through the Prototype Engineering Group

Recently, the Ferdinand-Braun-Institut has begun providing an even faster means for transforming outstanding research advances into processes, services, market-oriented products. The institute forged an active link between business and science with its Prototype Engineering Group in 2014. It offers companies simpler access to state-of-the-art research results. The four-person team of engineers headed by Ulrike Winkler is transferring research advances into functional models appropriate for practical application and prototypes. FBH is thus making the important step from the laboratory module to a device ready for field testing. This also assists companies in coming to market with state-of-the-art, competitive products.

Manageable systems are being created in the Prototype Engineering Group that make it easy for companies to test the R&D advances from FBH in their applications. These portable, autonomous devices help firms better assess the potential of FBH's research for their own development activity and production. Suitable components are transformed in close cooperation with the scientific divisions into laboratory modules that are then integrated to become operational units. You can find more details on p. 55.



← Team of the Prototype Engineering Group: T. Filler, K. Czajkowski, M. Neuner, U. Winkler (f.l.t.r.)  
Team des Entwicklungszentrums: T. Filler, K. Czajkowski, M. Neuner, U. Winkler (v.l.n.r.).

## F&E-Ergebnisse nutzbar machen – Prototypen aus dem Entwicklungszentrum

Seit kurzem sorgt das Ferdinand-Braun-Institut dafür, dass exzellente Forschungsergebnisse noch schneller in marktorientierte Produkte, Verfahren und Dienstleistungen überführt werden. Mit dem Entwicklungszentrum hat das Institut 2014 eine aktive Schnittstelle zwischen Wirtschaft und Wissenschaft geschaffen, die Unternehmen einen einfacheren Zugang zu Ergebnissen auf dem aktuellen Stand der Forschung bietet: Das vierköpfige Ingenieursteam unter Leitung von Ulrike Winkler transferiert Forschungsergebnisse in praxisgerechte Funktionsmodelle und Prototypen. Damit geht das FBH den wichtigen Schritt über das Forschungsmodul hinaus zum einsatzfähigen Gerät. Auf diese Weise hilft es Unternehmen auch, mit State-of-the-Art-Produkten konkurrenzfähig am Markt zu agieren.

Im Entwicklungszentrum entstehen handhabbare Systeme, die es Unternehmen ermöglichen, die F&E-Ergebnisse des FBH unkompliziert in ihren Anwendungen zu testen. Die tragbaren, autonomen Geräte helfen Firmen, die Einsatzpotenziale der FBH-Ergebnisse für die eigene Entwicklung und Produktion besser einzuschätzen. Entsprechende Komponenten werden in enger Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Abteilungen modularisiert und die Forschungsmodule funktionsfähig integriert. Weitere Details finden Sie auf S. 56.

## Multifaceted – supporting and training the next generation at FBH

The FBH has been offering a range of specialized opportunities and events to attract the next generation into science and technology (see also p. 52). For example, the FBH opened up its laboratories once again for 20 young women on Girls' Day. They received hands-on experience with experiments at various stations as well as picking up a lot of useful information all about diode lasers the size of rice grains. In addition, the fifth Girls' Technology Congress organized by the FBH took place in October 2014. Girls as early as the 7<sup>th</sup> grade from Berlin and Brandenburg experimented with light in workshops. Professional women, university students, and trainees from the STEM fields (science, technology, engineering, and maths) provided thorough answers to the many questions.



◀ Performing own experiments: Girls exploring the microtechnology world of work during the annual Girls' Day.

Selber experimenten: Mädchen erkunden die Arbeitswelt der Mikrotechnologie beim jährlichen Girls' Day.

The FBH also once again actively participated in the annual Science Days that take place in Adlershof every September. Two groups each with 16 senior high school pupils carried out experiments at the institute and were able to view the cleanrooms during a tour.

A great deal of effort has gone into the long-term development of activities like the Laser Study Group at the Alexander-von-Humboldt-Gymnasium (high school) and the comprehensive collaboration with the Lise Meitner School of Science with whom the FBH operates the joint MicroLAB for the school's pupils. Additional collaboration programs exist with the Albert Schweitzer Gymnasium and the Anne Frank Gymnasium under the State program for advanced vocational orientation. The joint activities include visits to the institute and participation in the Girls' Technology Congress.



◀ Pupil from the Laser Work Group of Alexander-von-Humboldt-Gymnasium at the Science Night.

Schüler der Laser AG des Alexander-von-Humboldt-Gymnasiums bei der Langen Nacht der Wissenschaften.

### For the laser experts of tomorrow – elective course on lasers

The FBH commenced its partnership with a school oriented toward the natural sciences, the Alexander-von-Humboldt-Gymnasium (AvH), ten years ago. Besides institute visits and internships for pupils, a regular Laser Study Group was launched and has been advised for several years by the Hybrid Laser Systems Group headed by Katrin Paschke. A total of 13 staff members of the FBH were actively involved with it during 2014. They explained to the six to eight pupils enrolled in the AvH advanced physics course how lasers work in general and specifically how semiconductor lasers operate. The pupils covered everything about semiconductor lasers through a combination of theory and practical experiments, including where they are employed, and how they are fabricated and measured. In addition, they delved into the world of lasers at FBH about once a month. They were then able to pass along their newly acquired knowledge to an interested public during the Science Night. The Laser Study Group has also already operated an information desk during one of the Laser Optics Berlin trade fairs.

### MicroLAB – a year-round opportunity for pupils

Experiments with all types of micro-components are the focus for MicroLAB. Pupils carry out typical processing steps in the lab that are used for fabrication of semiconductor components, such as developing a layout, vapor-depositing metals, photocoating and exposing, and etching. For microtechnology means creating extremely small features using these types of processes. This is the way the pupils learn about how these tiny and universally applicable components are made, which are found in nearly every technological solution – from personal computers, cell phones, and ABS brakes to airbags. At the end of the day's work, they are able to take the object they designed and made with them as a souvenir.

The teaching lab is operated jointly by the Lise Meitner School of Science (LMS) and the FBH. It offers each of the ten to fifteen pupils, teachers or students in teacher training programs opportunities well-suited to their needs: for school excursions to advanced teacher training or as a stimulus for preparing instructional units. The overall organization is in the hands of Norbert Schwarz, a physics and chemistry teacher at LMS specializing in microtechnology who prepares and distributes the necessary basic background knowledge. He receives support in the practical lab work as well from two staff members at a time from the FBH. This FBH team currently comprises Leonard Weixelbaum as the scientific contact together with technicians Jessica Behrchen, Karina Ickert, Daniel Schauer, and Saskia Schönfeld. Volker Bentlage subsequently takes over the group and bridges the experiments

in semiconductor fabrication from the school laboratory with insights into the scientific processes and procedures of daily research activity at FBH.

This extensive team together develops and tests the pupils' experiments and works out sensible supplements for the laboratory sequences. One particular challenge in MicroLAB is the broad range of participants. Every group must be addressed at its own level, so that the ninth graders on a career orientation tour benefit just as much from the event, for example, as participants from an advanced physics course, or teaching assistants doing in-service training. About 20 events took place at MicroLAB during 2014 with a total of 223 pupils as well as a course with six student teachers. In addition, there are also activities in the GenaU Network – an amalgamation of school labs emphasizing STEM at research institutions and universities in the Berlin Brandenburg region. MicroLAB presents and explains the role that microsystems technology plays in pacemakers with the help of application-oriented demonstrations in the GenaU series of experiments entitled "Experiments with Heart".

In addition, MicroLAB appears at trade shows like Laser Optics Berlin and the annual GenaU Meeting. And of course, the FBH promotes vocational training in microtechnology with its school lab.



◀ The FBH and partners presenting themselves and the Microtechnology Training Association at the Laser Optics Berlin.

Das FBH und Partnerfirmen präsentieren sich und den Ausbildungsverbund Mikrotechnologie auf der Laser Optics Berlin.

#### Training qualified next gens – new paths in dual vocational training

The demand for well-trained specialists in microsystems technology continues to be high. Besides the academic education and qualification of the next generation of scientists, the FBH has therefore been involved in basic and advanced training for many years (see also p. 53). The institute itself trains three young people as microtechnologists annually, thereby providing qualified personnel in a vocation with continued demand for the future, and networking closely with various schools and the regional state employment agency. In addition, it appears regularly at school informational events and training fairs like vocatium.

In order to facilitate the transition to university-level studies for trainees in the field of microtechnology, the FBH has developed a specialized process of recognition in cooperation with the Lise Meitner School and Brandenburg University of Applied Sciences. The curriculum of the vocational training is accorded academic credit toward the Bachelor's degree in Microsystems and Optical Technologies. The training and period of university study can be reduced up to one and a half years through this process. A similar process of recognition was also developed with HTW Berlin.

The FBH is increasingly working in the reverse direction as well, trying to attract university students who have broken off their studies as a new target group for dual vocational training. This is even more important, as the number of qualified applicants has been constantly falling in the past years. "Some of the training positions were only able to

be filled late or not at all", as Marlies Gielow knows. She is the contact for trainees at the institute and at the same time Chair of the Berlin Chamber of Industry and Commerce Board of Examiners for microtechnologists. The rate at which university studies are broken off is especially high in the natural sciences. Flexible educational models being developed by the FBH jointly with the Lise Meitner School can be used to apply university coursework toward vocational training and reduce the training period. This opens up new vocational prospects for young people that incorporate their previous knowledge. The FBH itself hired two former undergraduates with abbreviated apprenticeships through having entered directly in the second year.

The FBH is also testing new approaches during vocational training. The institute has been a member of the Microtechnology Training Association since its inception in 1998 and itself offers training within the association. In order to ensure training is comprehensive and high quality, trainees can look further than the end of the nose during excursions to companies like AEMtec and OSA Opto Light and vice versa. At the same time, the FBH has strengthened professional exchanges with other institutes and companies. Through work on various projects involving basic and advanced training over the years, the FBH has successfully built a close-knit network that is now well established. As a result, the training team at FBH working closely with OpTecBB and Berlin Partner has meanwhile taken over coordination of efforts to secure skilled personnel within the Optics Cluster in the Berlin Brandenburg region.

## Vielfältig – Nachwuchsförderung und Ausbildung am FBH

Seit vielen Jahren bietet das FBH eine Fülle spezialisierter Angebote und Veranstaltungsformate, um Nachwuchs für Wissenschaft und Technologie zu gewinnen (siehe auch S. 53). So öffnete das FBH im April 2014 erneut seine Labore für 20 Mädchen zum Girls' Day. An verschiedenen Stationen konnten die Mädchen selbst Hand bei Experimenten anlegen und nebenbei viel Wissenswertes rund um die reiskorngroßen Diodenlaser erfahren. Bereits zum fünften Mal fand im Oktober 2014 auch der vom FBH organisierte Mädchen-Technik-Kongress statt. In Workshops experimentierten Schülerinnen ab der siebten Klasse aus Berlin und Brandenburg mit Licht. Berufstätige Frauen, Studentinnen und Auszubildende aus dem MINT-Bereich (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft, Technik) standen bei allen Fragen Rede und Antwort.

Auch bei den Tagen der Forschung, die jährlich im September in Adlershof stattfinden, beteiligte sich das FBH wieder aktiv. Zwei Gruppen mit je 16 Schülerinnen und Schülern experimentierten am Institut und konnten bei einer Führung einen Blick in die staubfreien Reinraumlabore werfen.

Sehr viel Engagement fließt in langfristig angelegte Aktivitäten wie die Laser AG mit dem Alexander-von-Humboldt-Gymnasium und die umfassende Schulkooperation mit der Lise-Meitner-Schule, mit der das FBH auch das gemeinsame Schülerlabor MicroLAB betreibt. Weitere Schulkooperationen bestehen mit dem Albert-Schweitzer-Gymnasium und dem Anne-Frank-Gymnasium im Rahmen des Landesprogramms für vertiefte Berufsorientierung. Zu den gemeinsamen Aktivitäten zählen Institutsbesichtigungen und die Beteiligung am Mädchen-Technik-Kongress.

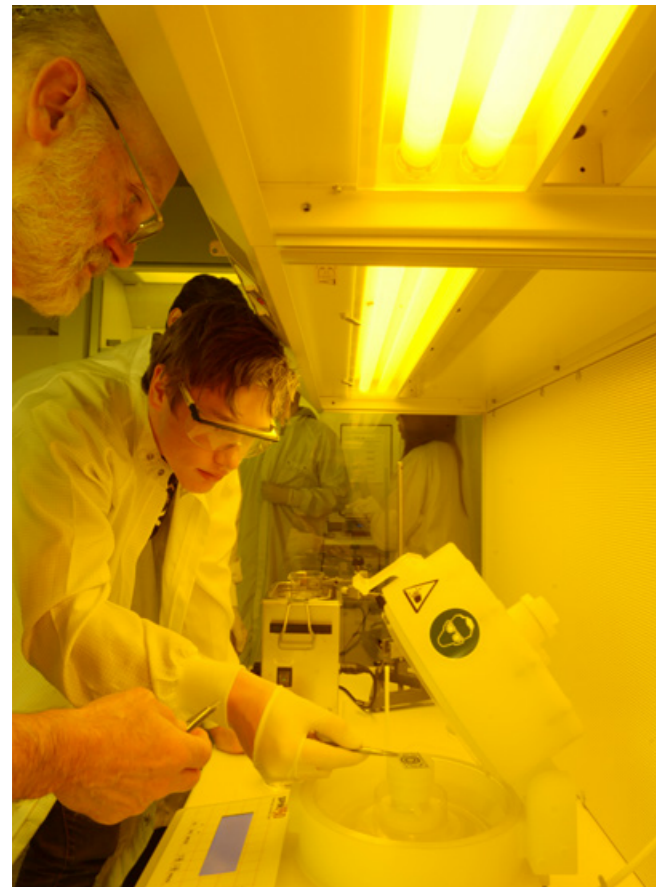
#### Für Laserexperten in spe – die Laser AG

Vor zehn Jahren hat das FBH seine Schulpartnerschaft mit dem naturwissenschaftlich orientierten Alexander-von-Humboldt-Gymnasium (AvH) in Köpenick begonnen. Neben Schülerpraktika und Institutsbesuchen wurde 2006 eine regelmäßige Laser AG gestartet, die seit einigen Jahren von der Gruppe „hybride Lasersysteme“ unter Leitung von Katrin Paschke betreut wird. Insgesamt waren 13 Kolleginnen und Kollegen des FBH hier 2014 aktiv eingebunden. Sie erklärten den sechs bis acht beteiligten Schülerinnen und Schülern des Physik-Leistungskurses der AvH, wie ein Laser im Allgemeinen und ein Halbleiterlaser im Besonderen funktionieren. In einer Mischung aus Theorie und praktischen Experimenten

erfahren die Schüler alles rund um Halbleiterlaser: wo sie eingesetzt, wie sie hergestellt und vermessen werden. Dazu tauchten sie etwa einmal im Monat in die Tiefen der „Laserwelt“ am FBH ein. Ihr neu erworbenes Wissen konnten sie dann zur Langen Nacht der Wissenschaften einem interessierten Publikum vermitteln. Auch mit einem Infostand auf der Fachmesse Laser Optics Berlin war die Laser AG bereits einmal vertreten.

#### Ein Angebot fürs ganze Jahr – Schülerlabor MicroLAB

Experimente rund um Mikro-Bauelemente stehen im Fokus des Schülerlabors MicroLAB. Hier führen Schülerinnen und Schüler typische Arbeitsschritte durch, die zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen genutzt werden: Sie entwickeln ein Layout, dampfen Metalle auf, belackten, belichten und ätzen. Denn Mikrotechnologie bedeutet, kleinste Strukturen mit derartigen Verfahren zu erzeugen. So erfahren die Schüler, wie die winzigen Alleskönner entstehen, die in beinahe jeder technischen Lösung stecken – vom PC, Handy, ABS bis hin zum Airbag. Am Ende des Labortages können sie das selbst entworfene und gefertigte Objekt als Souvenir mitnehmen.



< Pupils in the MicroLAB conducting semiconductor structuring experiments.

Schüler, die im MicroLAB Experimente zur Halbleiterstrukturierung durchführen.

Das Schülerlabor wird gemeinsam von der Lise-Meitner-Schule (LMS) und dem FBH betrieben. Es bietet jeweils 10 bis 15 Schülern, Lehrern oder Lehramtsstudierenden passgenaue Angebote: für die Schulexkursion, zur Lehrer-Weiterbildung oder als Anregung für die Gestaltung von Unterrichtseinheiten. Die Gesamtorganisation liegt in den Händen von Norbert Schwarz, einem auf Mikrotechnologie spezialisierten Physik- und Chemielehrer an der LMS, der das nötige Hintergrundwissen pädagogisch aufbereitet und vermittelt. Bei der praktischen Laborarbeit wird er von jeweils zwei Kollegen aus dem FBH unterstützt. Dieses FBH-Team bilden derzeit Leonard Weixelbaum als wissenschaftlicher Ansprechpartner gemeinsam mit den technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Jessica Behren, Karina Ickert, Daniel Schauer und Saskia Schönfeld. Anschließend übernimmt Volker Bentlage die Gruppe und verbindet bei seiner Institutsführung am FBH die Experimente zur Halbleiterstrukturierung im Schülerlabor mit Einblicken in wissenschaftliche Prozesse im Forschungsalltag.



< Leonard Weixelbaum (r.) is explaining how lithography works to a group of pupils in the MicroLAB.

Leonard Weixelbaum (r.) erklärt einer Schülergruppe im MicroLAB, wie Lithografie funktioniert.

Gemeinsam erprobt und entwickelt dieses übergreifende Team die Schülerexperimente weiter und tüfelt an sinnvollen Ergänzungen für den Ablauf im Labor. Eine besondere Herausforderung im MicroLAB ist die große Bandbreite der Teilnehmer. Jede Gruppe muss auf ihrem Niveau „abgeholt“ werden, damit Neuntklässler auf Berufsorientierungstour ebenso von der Veranstaltung profitieren wie Teilnehmende eines Physik-Leistungskurses oder Referendare. Etwa 20 Veranstaltungen fanden 2014 im MicroLAB mit insgesamt 223 Schülerinnen und Schülern statt sowie ein Kurs mit sechs Studienreferendaren. Hinzu kommen weitere Aktivitäten im Netzwerk GenaU – ein Zusammenschluss von Schülerlaboren mit MINT-Schwerpunkten an Forschungseinrichtungen und Hochschulen in Berlin und Brandenburg. So erklärt das MicroLAB im Rahmen der GenaU-Reihe „Experimente mit Herz“ anhand praktischer Experimente was Mikrosystemtechnik mit Herzschrittmachern zu tun hat.

Das MicroLAB präsentiert sich zudem auf Messen wie der Laser Optics Berlin oder der GenaU-Jahrestagung. Nicht zuletzt wirbt das FBH mit seinem Schülerlabor für die Mikrotechnologie-Berufsausbildung.

#### Qualifizierten Nachwuchs ausbilden – neue Wege in der dualen Berufsausbildung

Der Bedarf an gut ausgebildeten Fachkräften in der Mikrosystemtechnik ist nach wie vor hoch. Neben der akademischen Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses engagiert sich das FBH daher seit vielen Jahren in der Aus- und Weiterbildung (siehe auch S. 54). Das Institut selbst bildet pro Jahr drei junge Menschen zu Mikrotechnologen aus und sorgt damit für qualifizierten Nachwuchs in einem Zukunftsberuf. Es arbeitet dabei eng vernetzt mit verschiedenen Schulen und der regionalen Arbeitsagentur zusammen. Zudem präsentiert es sich regelmäßig bei Schülerinformationsveranstaltungen und auf Ausbildungsmessen wie der vocatium.

Um Auszubildenden im Beruf Mikrotechnologe/-in den Übergang zum Studium zu erleichtern hat das FBH in Zusammenarbeit mit der Lise-Meitner-Schule (LMS) und der Fachhochschule Brandenburg ein spezielles Anerkennungsverfahren entwickelt. Für den Bachelor „Mikrosystemtechnik und optische Technologien“ werden Ausbildungsinhalte anerkannt. Die Ausbildungs- und Studienzeit kann dadurch um bis zu eineinhalb Jahre verkürzt werden. Ein ähnliches Anerkennungsverfahren wurde auch mit der HTW Berlin entwickelt.

Zunehmend geht das FBH auch den umgekehrten Weg und versucht mit Studienabbrechern neue Zielgruppen für die duale Berufsausbildung zu gewinnen. Das ist umso wichtiger, da die Zahl der qualifizierten Bewerberinnen und Bewerber in den vergangenen Jahren stetig gesunken ist. „Dadurch konnten Ausbildungsplätze teils erst verspätet oder gar nicht besetzt werden“, weiß Marlies Gielow zu berichten. Sie ist die Ansprechpartnerin für die Auszubildenden am Institut und zugleich Vorsitzende des IHK-Prüfungsausschusses für Mikrotechnologen/-innen in Berlin. Gerade in den naturwissenschaftlich-technischen Fächern ist die Abbruchquote hoch. Mit flexiblen Modellen, die vom FBH gemeinsam mit der Berufsschule LMS entwickelt werden, können Ausbildungszeiten verkürzt und Studieninhalte auf die Ausbildung angerechnet werden. Das eröffnet jungen Menschen neue Berufsperspektiven, die die Vorkenntnisse einbeziehen. Das FBH selbst hat 2014 zwei Studienabbrecher mit verkürzter Lehrzeit eingestellt, die gleich ins zweite Lehrjahr einsteigen konnten.

Neue Wege testet das FBH auch während der Berufsausbildung. Das Institut ist seit der Gründung im Jahr 1998 Mitglied im Ausbildungsverbund Mikrotechnologie und bietet selbst Verbundausbildung an. Um eine umfassende Ausbildung mit hoher Qualität zu sichern, werfen Auszubildende bei Exkursionen zu Unternehmen wie AEMtec oder OSA Opto Light einen Blick über den Tellerrand und umgekehrt. Zugleich stärkt das FBH den fachlichen Austausch mit anderen Instituten und Unternehmen. Über die Arbeit in verschiedenen Projekten zum Thema Aus- und Weiterbildung ist es über die Jahre gelungen, ein enges Netzwerk aufzubauen und zu etablieren. Daher hat das Bildungsteam am FBH in enger Zusammenarbeit mit OpTecBB und Berlin Partner inzwischen die Koordination der Fachkräftesicherung im Cluster Optik in Berlin und Brandenburg übernommen.

## Extension building – move-in scheduled for 2015

The cornerstone for the extension building at FBH was laid in September 2013. The interior finishing work commenced once the building envelope was completed in 2014. The extension will provide 1,800 m<sup>2</sup> of additional space for laboratories and offices and become available in summer 2015. FBH staff members got a first impression of the new building during personnel discussions that took place in the unfinished building as part of the institute evaluation process in June 2014.



← Expert group meeting FBH employees in the unfinished extension building during the evaluation process.

Mitarbeitergespräch mit der Gutachtergruppe anlässlich der Evaluierung im Rohbau des FBH-Erweiterungsbaus.

## Erweiterungsbau – Bezug in 2015

Im September 2013 wurde der Grundstein für den Erweiterungsbau des FBH gelegt. Der Rohbau wurde 2014 fertiggestellt, anschließend folgte der Innenausbau. Damit werden ab Sommer 2015 1.800 qm zusätzliche Flächen für Labor- und Büroräume zur Verfügung stehen. Einen ersten Eindruck vom neuen Gebäude bekamen die Kolleginnen und Kollegen des FBH anlässlich des Mitarbeitergesprächs bei der Evaluierung im Juni 2014 im Rohbau.

## Exchanges with experts at conferences & trade shows

The FBH again presented its research advances at the large national and international meetings for the branch in 2014. Among other events, it enjoyed prominence at Photonics West, the leading global trade show and conference for optics and photonics, through its 20 professional papers demonstrating FBH's capability in diode lasers and UV LEDs. The institute presented its newest advances in optoelectronics at its booth in the Laser Optics Berlin trade show as well as making specialist contributions at the parallel conference. The Ferdinand-Braun-Institut was represented at several conferences in the fields of materials, microwave components, and GaN power electronics as well, including the German Microwave Conference, the International Microwave Symposium in the USA, the International Conference on Semiconductor Manufacturing Technology CSMANTECH, as well as the International Workshop on Nitride Semiconductors.

And not just the institute itself, but also its spin-offs presented their results. Two spin-off companies from the Ferdinand-Braun-Institut have just showcased their newest work at the world's most important industrial trade fair – the Hanover Trade Show: BEAPLAS develops and markets processes and devices for manufacturing thin layers at atmospheric pressure, while Phasor Instruments is active in the area of network analysis and is developing measurement devices for microwave technology needed for plasma excitation among other applications.

## Expertenaustausch auf Konferenzen & Messen

Auch 2014 hat das FBH seine Forschungsergebnisse auf den großen internationalen und nationalen Branchentreffen vorgestellt. So war das FBH mit seinen Diodenlasern und UV-Leuchtdioden unter anderem auf der „Photonics West“, der weltweit führenden Fachmesse und Konferenz für Optik und Photonik, mit 20 Fachbeiträgen prominent vertreten. Auf der „Laser Optics Berlin“ präsentierte das Institut aktuelle Entwicklungen am Messestand sowie in verschiedenen Fachbeiträgen auf der begleitenden Konferenz. Auch im Bereich der Materialien, Mikrowellen-Bauelemente und GaN-Leistungselektronik war das Ferdinand-Braun-Institut auf mehreren Konferenzen vertreten, darunter die „German Microwave Conference“, das „International Microwave Symposium“ in den USA, die internationale Konferenz zu Halbleiter-Fertigungstechnologien „CSMANTECH“ sowie der „International Workshop on Nitride Semiconductors“.

Nicht nur das Institut selbst, sondern auch seine Ausgründungen stellten sich und ihre Ergebnisse vor. Auf der weltweit wichtigsten Industriemesse „Hannover Messe“ präsentierten gleich zwei Spin-offs aus dem Ferdinand-Braun-Institut aktuelle Entwicklungen: BEAPLAS entwickelt und vertreibt Verfahren und Geräte zur Herstellung dünner Schichten bei Atmosphärendruck. Phasor Instruments ist im Bereich der Netzwerkanalyse aktiv und entwickelt Messgeräte für die Mikrowellentechnik, die unter anderem zur Plasmaanregung benötigt werden.

## Personnel & Awards



### Markus Weyers appointed Adjunct Professor

Markus Weyers was appointed Adjunct Professor at the Technische Universität Berlin on June 16. He is responsible for the area of Applied Physics in the Faculty of Mathematics and Natural Sciences.

### Humboldt Prize recipient Russell Dupuis at FBH

Prof. Russell Dupuis (Georgia Institute of Technology) has been a guest of Technische Universität Berlin and the FBH since mid-February. He is participating in research work on GaN devices.

### Joint Lab invigorated: Goethe Leibniz Terahertz Center

The FBH has further consolidated the collaboration with Viktor Krozer and Goethe University Frankfurt through the newly established joint Goethe Leibniz Terahertz Center. An important cornerstone is the professorship held by Viktor Krozer that will be jointly financed by the FBH and Goethe University Frankfurt. Under this agreement, the long-term collaboration will push ahead on development of new components such as sources, beam components, and detectors for terahertz radiation – right through to the application of terahertz technologies.

### Laser Association honors the Optoelectronics Department

The department was honored on November 18 for its research on diode lasers as well as for its years of successful collaborations with companies in the region. Department head Götz Erbert commented: "The many advances through to operational systems would not have been possible without the close cooperation of colleagues from the other departments at FBH and from the technical services unit".

◀ Prof. Markus Weyers is the Head of FBH's Materials Technology Department.

Prof. Markus Weyers leitet am FBH die Abteilung Materialtechnologie.

## Personalia & Auszeichnungen

### Markus Weyers zum Professor berufen

Am 16. Juni wurde Markus Weyers zum außerplanmäßigen Professor an die Technische Universität Berlin berufen. Er vertritt in der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften das Fachgebiet Angewandte Physik.

### Humboldt-Preisträger Russell Dupuis am FBH

Prof. Russell Dupuis (Georgia Institute of Technology) ist seit Mitte Februar zu Gast an der TU Berlin und am FBH. Er beteiligt sich an Forschungsarbeiten zu GaN-Bauelementen.

### Joint Lab verstetigt: Goethe-Leibniz-Terahertz-Zentrum

Im Oktober 2014 hat das FBH die Zusammenarbeit mit Viktor Krozer und der Goethe-Universität in Frankfurt a.M. mit dem neu geschaffenen, gemeinsamen Goethe-Leibniz-Terahertz-Zentrum verstetigt. Ein wesentlicher Baustein ist dabei die Professur von Viktor Krozer, die von FBH und Goethe-Universität gemeinsam finanziert wird. In diesem Rahmen soll die langjährige Kooperation zur Entwicklung neuer Komponenten, wie etwa Quellen, Strahlkomponenten und Detektoren für Terahertz-Strahlung, vorangetrieben werden – bis hin zur Anwendung der Terahertz-Technologien.



## Laserverbund zeichnet Abteilung Optoelektronik aus

Die Abteilung wurde am 18. November für ihre Forschungen zu Diodenlasern sowie für ihre langjährigen erfolgreichen Kooperationen mit Unternehmen in der Region geehrt. Dazu sagte der Abteilungsleiter Götz Erbert: „Die vielen Ergebnisse bis hin zu einsatzfähigen Systemen wären ohne die enge Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen aus den anderen Fachabteilungen des FBH und der Technischen Dienste so nicht möglich.“



◀ Helmut Ringelhan, chairman of the Laserverbund Berlin-Brandenburg, awarding Götz Erbert with the Laser star and certificate.

Helmut Ringelhan, Vorsitzender des Laserverbundes Berlin-Brandenburg, überreicht Götz Erbert Laserstern und Urkunde.

## New corporate design for the FBH

The FBH modernized its appearance at the end of 2014 and introduced a new corporate design package including a newly created logo.

## FBH im neuen Design

Zum Jahresende 2014 hat das FBH sein Erscheinungsbild modernisiert und ein neues Corporate Design inklusive neu gestaltetem Logo eingeführt.





## Social action day instead of institute trip

Volunteers from the FBH began last year providing practical support to a social project instead of going on an annual outing. About 30 helping hands from the institute provided their assistance that day to the Fairness FiPP e. V. youth club in Berlin-Altglienicke in 2014. A lot of manual work was waiting to be done that could not have been accomplished by the club's advisors without additional help. FBH staff were certainly kept busy with painting, removal of walls, and various garden work – and energetically supported by the children and young people from the club in the afternoon. The evening finished up with basketball and a campfire.

### Aktionstag statt Betriebsausflug

*Im Vorjahr hatten Freiwillige aus dem FBH begonnen, anstelle eines Betriebsausflugs ein soziales Projekt pragmatisch zu unterstützen. 2014 fanden sich knapp 30 helfende Hände aus dem Institut, die dem Jugendclub Fairness FiPP e. V. in Berlin-Altglienicke an diesem Tag unter die Arme griffen. Es standen viele handwerkliche Arbeiten an, die von den Betreuerinnen und Betreuern ohne zusätzliche Hilfe nicht zu leisten wären. Jedenfalls waren die Kolleginnen und Kollegen mit Malerarbeiten, Entfernen von Mauern und verschiedenen Gartenarbeiten gut beschäftigt – ab Nachmittag tatkräftig unterstützt von den Kindern und Jugendlichen aus dem Club. Der Abend klang gemeinsam bei Basketball und Lagerfeuer aus.*



◀ Helping hands during the social action day at Fairness FiPP e. V. youth club.

Helfende Hände beim Aktionstag im Jugendclub Fairness FiPP e. V.



Science Management

Wissenschaftsmanagement

## Science Management – comprehensive services and strategic networking for thriving research and development

The Science Management Department strategically advises and supports the director as well as FBH scientists regarding industrial projects, project funding, and in establishing R&D cooperation. By positioning the institute in local, regional, national, and international networks, the department helps increasing its public visibility. Moreover, research and industrial partners benefit from these activities. The interdisciplinary team accomplishes administrative and non-scientific work related to complex collaborative projects and coordinates national and international networks. An additional activity is to recruit and promote young people in high technology fields and to coordinate educational projects and training networks. Furthermore, the central service units administration and IT support are assigned to the Science Management Department.

One highlight in 2014 was the establishment of the 'Advanced UV for Life' consortium, with the FBH being responsible for the overall management of activities including strategy development. Currently, 31 German partner institutions are joining forces in research, development, and application of UV-LED technology. This versatile network also reflects FBH's fundamental strategic approach to cooperate closely with partners from research and industry, which additionally increases the institute's public visibility within the respective technology field. Consequently, the FBH also continued its activities within the regional technology networks Berlin WideBaSe, the Centre for Microsystems Technology (ZEMI), and the competence network for optical technologies OpTecBB.

In the area of technology transfer, a Prototype Engineering Group is currently being established. Its aim is to transfer the results of research into applications even more rapidly and effectively. One main focus lies on opening up new application areas, such as the use of UV LEDs in agriculture. With a systematized device development accompanied by an effective project management, components and modules of the FBH can be integrated into systems and will be demonstrated ready for use.

In the education and training field, attracting young people to training and careers in science and technology continues to be the main focus of activities. Established formats like the Girls' Technology Congress were carried on in 2014, adding an international dimension to the event due to FBH's participation in the EU consortium GoPhoton!. Within the Optics Cluster Berlin Brandenburg new initiatives have been started in the field of further training and competence management, meeting the needs of technological and demographic change.

## Wissenschaftsmanagement – vielfältige Dienstleistungen und strategische Vernetzung für Forschung und Entwicklung

*Die Abteilung berät und unterstützt die Institutsleitung sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am FBH strategisch bei Industrieprojekten, Fördervorhaben und beim Aufbau von F&E-Kooperationen. Sie positioniert das Institut in lokalen, regionalen, nationalen und internationalen Netzwerken und erhöht so dessen öffentliche Sichtbarkeit. Auch Forschungs- und Unternehmenspartner des FBH profitieren von diesen Aktivitäten. Das interdisziplinär aufgestellte Team übernimmt administrative und nicht-wissenschaftliche Arbeiten, die bei der Beantragung komplexer Verbundvorhaben, der Koordination nationaler und internationaler Projektverbünde oder bei der Entwicklung und dem Management*

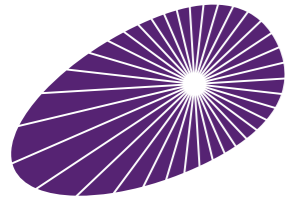
solcher Vorhaben anfallen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Nachwuchsförderung im naturwissenschaftlichen Bereich sowie die Koordination von Vorhaben zur Aus- und Weiterbildung in Hochtechnologien. Darüber hinaus sind dem Wissenschaftsmanagement die Verwaltung und die EDV zugeordnet.

Ein Highlight im Bereich Strategie war 2014 der Auf- und Ausbau des Konsortiums „Advanced UV for Life“. Das FBH koordiniert die Aktivitäten zur Strategieentwicklung und leitet das Konsortium. Die mittlerweile 31 deutschen Partneereinrichtungen arbeiten gemeinsam an der Erforschung, Entwicklung sowie der Anwendung der UV-LED-Technologie. Diese enge Vernetzung mit Partnern aus Forschung und Wirtschaft ist ein grundlegender strategischer Ansatz des FBH, der die Sichtbarkeit des Instituts innerhalb des jeweiligen Themenfeldes zusätzlich erhöht. Daher hat das FBH auch 2014 seine Aktivitäten im Rahmen der regionalen Technologie-Netzwerke Berlin WideBaSe, Zentrum für Mikrosystemtechnik Berlin (ZEMI) und des Kompetenznetzes Optische Technologien OpTecBB fortgeführt.

Im Bereich des Technologietransfers wird derzeit ein Entwicklungszentrum für Prototypen aufgebaut, mit dem Forschungsergebnisse des Instituts noch schneller in Applikationen überführt werden sollen. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf neuen Anwendungsgebieten, wie beispielsweise dem Einsatz von UV-LEDs in der Landwirtschaft. Mit einem systematisierten Gerätebau und begleitet von einem effektiven Projektmanagement werden die Komponenten und Module des FBH in Systeme integriert und einsatzfähig demonstriert.

Bei den Aktivitäten im Bildungsbereich stehen weiterhin Nachwuchswerbung und -sicherung im naturwissenschaftlich-technischen Bereich im Mittelpunkt. 2014 wurden etablierte Formate wie der Mädchen-Technik-Kongress fortgeführt und dank der Mitwirkung im EU-Konsortium GoPhoton! stärker international ausgerichtet. Für das Cluster Optik Berlin-Brandenburg wurden neue Initiativen zur beruflichen Qualifizierung im Hochtechnologiebereich und zum Kompetenzmanagement angeschoben, um den Herausforderungen des technologischen und demografischen Wandels gerecht zu werden.

## Focus on strategy – the Zwanzig20 consortium ‘Advanced UV for Life’



### ADVANCED UV FOR LIFE

In 2014, the ‘Advanced UV for Life’ consortium, coordinated by the Ferdinand-Braun-Institut, has been concentrated on developing the common strategy and on reinforcing the technological base. Currently, 31 interdisciplinary partners from research and industry address the research and development of UV-LED technology, its applications, and transfer into marketable products. The consortium is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the program “Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation” (Twenty20 – Partnership for Innovation).

‘Advanced UV for Life’ was one of the ten selected initial concepts from altogether 59 drafts submitted in 2013. Subsequently, the partners have refined and partly re-written their common strategy with focus on scientific and technological, economic, and organizational objectives. The partnership structure has also been enhanced in the meantime – especially in the field of application and exploitation of UV LEDs. Currently, 18 companies and 13 research institutions join forces within the consortium, covering the entire value chain – from materials research to device and system development up to the final application.

In the middle of 2014, the intermediate state of strategy development was positively evaluated. First R&D projects were thoroughly assessed by the advisory board and then recommended for funding. As a result, the FBH and the Technische Universität Berlin could invest to expand their technological basis within the ‘Joint Lab GaN Optoelectronics’, accelerating research activities related to UV LED chip development. Furthermore, FBH and TU Berlin have started to develop efficient manufacturing processes for UV-B LEDs (310 nm)

with high quantum efficiency. The industrial partner LayTec, for example, will develop improved procedures for process control used in metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE). At the end of November, the consortium partners submitted their jointly developed strategy and roadmap for the next five years to the BMBF, including short-term R&D activities. This document will be assessed by a committee of experts and then reviewed by the advisory board of the consortium in the first quarter of 2015. The recommendation of R&D projects for funding is the most decisive part in this process. In any case, this strategy and the related projects are the precondition for realizing the ideas addressing innovative semiconductor UV products and their related application systems.



Application fields of ‘Advanced UV for Life’ consortium.  
Anwendungsfelder des Konsortiums „Advanced UV for Life“.

## Strategie im Fokus – das Zwanzig20-Konsortium „Advanced UV for Life“

Bei dem vom FBH geführten Konsortium „Advanced UV for Life“ stand das Jahr 2014 ganz im Zeichen von Strategieentwicklung und Stärkung der technologischen Basis. Die mittlerweile 31 interdisziplinären Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft widmen sich der Aufgabe, die UV-LED-Technologie anwendungsspezifisch zu erforschen und zu entwickeln. Gemeinsam wollen sie die entsprechenden F&E-Ergebnisse rasch zur Vermarktung bringen. Gefördert wird das Konsortium vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“.

Ausgehend vom Initialkonzept, mit dem sich das Konsortium 2013 erfolgreich im Wettbewerb gegen 59 Mitbewerber durchgesetzt hatte, haben die Partner die gemeinsame Strategie weiterentwickelt und teilweise neu verfasst. Der Fokus lag dabei auf wissenschaftlich-technologischen, ökonomischen und organisatorischen Zielstellungen. Außerdem wurde die Partnerstruktur erweitert, so dass dem Konsortium mittlerweile 18 Unternehmen und 13 Forschungseinrichtungen angehören. Vor allem die Bereiche Anwendung und Verwertung von UV-LEDs konnten durch neue Partner gestärkt werden. Dadurch kann die gesamte Wertschöpfungskette – von der Materialforschung über die Bauelemententwicklung und deren Integration in Systeme bis zur Endanwendung – bedient werden.

Erste Forschungsvorhaben wurden bereits zur Förderung empfohlen, nachdem der Beirat und das BMBF den Zwischenstand der Strategieentwicklung Mitte des Jahres positiv bewertet hatten. Dadurch wurden dem FBH und der Technischen Universität Berlin Investitionen zur Erweiterung der technologischen Basis des „Joint Lab GaN-Optoelektronik“ bewilligt, um die Forschungsarbeiten und Entwicklungen zu UV-LEDs zu beschleunigen. Unter anderem hat das FBH gemeinsam mit der TU Berlin begonnen, effiziente Herstellungsprozesse für UV-B-LEDs (um 310 nm) mit hoher Quanteneffizienz zu entwickeln. Der Industriepartner LayTec entwickelt dabei Verfahren für eine verbesserte Prozesskontrolle in der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE).

Ende November wurde die von den Partnern gemeinsam erarbeitete Strategie und Roadmap inklusive zeitnah geplanter Vorhaben beim BMBF eingereicht. Die Unterlagen werden im 1. Quartal 2015 erneut von einem Expertengremium und dem Beirat des Konsortiums begutachtet. Entscheidend sind hierbei die Empfehlungen zur Förderung der verschiedenen Forschungsvorhaben. Die Strategie und die Bearbeitung der daraus abgeleiteten Vorhaben sind die Voraussetzungen dafür, dass die innovativen Ideen für Halbleiter-UV-Produkte und deren Anwendungen realisiert werden können.

## Expanded educational activities – offers from vocational orientation to further education

To inform young people – especially girls – about training opportunities and career prospects in science and technology continued to be one of the main issues addressed by FBH's Science Management Department in 2014. Accordingly, the FBH team pursued a great variety of established activities and introduced new ones:



← Girls painting with light at 5<sup>th</sup> Girls' Technology Congress.  
Mädchen malen mit Licht während des 5. Mädchen-Technik-Kongresses.

### Girls' Technology Congress becomes international

As one of the highlights, the 5<sup>th</sup> Girls' Technology Congress for Berlin-Brandenburg pupils from 7<sup>th</sup> grade was held on October 10<sup>th</sup>, 2014 with a special focus on photonics. This time, the congress was part of the European GoPhoton! project initiated by the European Centres for Outreach in Photonics (ECOP) and funded through the FP7 program. With the help of GoPhoton! the congress in Berlin added a European dimension to the event since some of the workshops were held in English by partners from Barcelona and Brussels. In addition to that, a writing contest dedicated to photonics, i.e., light and light-based technologies was imported as a good practice example from the research institution ICFO in Barcelona and launched at the congress. Pupils from schools in Berlin and Brandenburg have been asked to submit own texts dealing with light. The ones considered most interesting will be set to music and performed in 2015, corresponding to the International Year of Light.

### Toolbox for mobile outreach activities

To enable hands-on experiences on trade fairs, conferences, and school events the FBH developed a toolbox comprising different experiments based on microtechnology, optics, and nanotechnology. The mobile set is designed for outreach activities and will be used by FBH staff addressing teachers as well as students to provide insight into technological phenomena and related occupational profiles.

### Promising career prospects in photonics

In 2014 the training and education group at FBH acted as official contact point and coordinator concerning outreach and training issues within the regional Photonics Cluster. A mix of actions was taken to spread information about career prospects in STEM (science, technology, engineering, and mathematics) in close cooperation with OpTecBB, the competence network for optical technologies and microsystems technology in Berlin Brandenburg. Activities included information days for schools as well as presentations at education and training fairs and exhibitions.

To raise the quality and attractiveness of vocational training in high technology and to support companies and institutes in training matters is still a significant challenge: many professions and training opportunities are still fairly unknown and partly regarded as too difficult or rather "boring". Thus, the training and education group supported the training at the FBH and within the training association "Ausbildungsverbund Mikrotechnologie Berlin-Brandenburg". Activities within the former regional network (ANH Berlin) were rather limited in 2014 due to lack of funding. However, new initiatives were launched in the field of further training and competence management.

### New initiatives: beQual and AlFaClu

beQual (betriebliche Qualifizierung im Cluster Optik) is based on a survey conducted in 2013, which indicated that by enhancing the cooperation between companies and research institutes existing resources and competencies could be utilized for training in a more effective and synergetic way. Thus, a related pilot project was started in September 2014 offering several short training units for staff from companies and research institutions.

Within AlFaClu, a research project funded by the Federal Ministry for Education and Research, the effects of demographic change in the Photonics Cluster are analyzed. Subsequently, adequate instruments and strategies will be developed, meeting the challenges that companies and research institutes are facing. In this project, the FBH as member of ZEMI (Center of Microsystems Technology Berlin) cooperates with two universities from Hamburg.

## Erweiterte Bildungsaktivitäten – Angebote von der Berufsorientierung bis zur Weiterbildung

*Eines der Hauptthemen des Wissenschaftsmanagements am FBH ist weiterhin, junge Menschen über Ausbildungsmöglichkeiten und Karrierewege in Wissenschaft und Technik zu informieren. Speziell Mädchen sollen dabei für Berufe im naturwissenschaftlichen Bereich begeistert werden. Dazu führte das FBH-Team eine große Bandbreite von Aktivitäten durch – etablierte ebenso wie neue.*

### Mädchen-Technik-Kongress wird international

*Am 10. Oktober 2014 fand als eines der Highlights der 5. Mädchen-Technik-Kongress für Schülerinnen ab der 7. Klasse aus Berlin und Brandenburg statt. Der Fokus lag dabei auf der Photonik. Als Teil des europäischen Projekts GoPhoton!, das durch die European Centres for Outreach in Photonics (ECOP) initiiert und im 7. Rahmenprogramm der EU finanziert wird, war der Kongress zugleich stärker international ausgerichtet. Einige der Workshops wurden von Partnern aus Brüssel oder Barcelona in englischer Sprache angeboten und verliehen der Veranstaltung somit eine europäische Dimension. Zusätzlich wurde ein Schreibwettbewerb zum Thema Photonik gestartet, der als „Good-Practice-Beispiel“ vom Institute of Photonic Sciences ICFO aus Barcelona übernommen wurde. Schülerinnen und Schüler aus Berlin und Brandenburg wurden aufgerufen, eigene Texte zum Thema Licht beziehungsweise lichtbasierte Technologien einzusenden. Eine Jury wählt dann die spannendsten Beiträge aus, die vertont und 2015 anlässlich des Internationalen Jahrs des Lichts aufgeführt werden.*

### Experimentierkoffer – mobil um Nachwuchs werben

Selber Experimentieren macht Spaß! Um dies dem Publikum auch auf Messen, Konferenzen oder Schulevents zu ermöglichen, hat das FBH eine Toolbox mit verschiedenen Experimenten zu Mikrosystemtechnik, Optik und Nanotechnologie entwickelt. Der mobile Koffer ist für verschiedene Aktivitäten der Nachwuchswerbung geeignet und wird von FBH-Mitarbeitern genutzt, um Multiplikatoren, wie etwa Lehrkräften, aber auch Schülergruppen einen Einblick in technologische Phänomene und die zugehörigen Berufe zu geben.



◀ Toolbox for outreach activities.  
Toolbox für Außerhausaktivitäten.

### Vielversprechende Karriereaussichten in der Photonik

Seit 2014 ist die Gruppe Bildungsmanagement am FBH die offizielle Kontaktstelle im Cluster Optik für die Themen Bildung und Fachkräftesicherung. In enger Zusammenarbeit mit OpTecBB, dem Kompetenznetzwerk für optische Technologien und Mikrosystemtechnik in Berlin und Brandenburg, informiert das FBH-Team aktiv über Perspektiven in MINT-Berufen (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik): durch Informationstage für Schulen, Präsentationen auf Bildungsmessen und Ausstellungen etc.

Eine große Herausforderung besteht nach wie vor darin, die Qualität und Attraktivität der Ausbildung im Hochtechnologiesektor zu erhöhen und Firmen und Institute bei der Ausbildung zu unterstützen. Noch immer sind viele Berufe und Weiterbildungsmöglichkeiten zu wenig bekannt oder leiden unter Vorurteilen, wonach sie als „zu schwierig“ oder „relativ langweilig“ eingeschätzt werden. Daher unterstützt die Gruppe Bildungsmanagement nicht nur die Ausbildung am FBH, sondern auch innerhalb des Ausbildungsverbundes Mikrotechnologie Berlin-Brandenburg. Weiterreichende Aktivitäten im Rahmen des regionalen Netzwerks ANH Berlin mussten 2014 mangels Förderung stark zurückgefahren werden. Jedoch starteten auch neue Initiativen im Bereich Weiterbildung und Kompetenzmanagement.

### Neue Initiativen: beQual und AlFaClu

beQual (betriebliche Qualifizierung im Cluster Optik) basiert auf einer Umfrage aus dem Jahr 2013. Diese zeigte, dass durch bessere Kooperation von Firmen und Forschungseinrichtungen vorhandene Ressourcen und Kompetenzen deutlich effektiver zur Weiterbildung genutzt werden könnten. Im Rahmen des im September 2014 gestarteten Pilotprojekts entwickelte das FBH-Team daher eine Reihe von kurzen und bedarfsgerechten Trainingseinheiten für Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen von Firmen und Instituten.

Im Forschungsprojekt AlFaClu, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird, werden die Effekte des demographischen Wandels im Cluster Optik untersucht. Darauf aufbauend entwickelt das Projektteam Instrumente und Strategien, die den Herausforderungen einer alternden Gesellschaft gerecht werden, vor denen Firmen und Institute stehen. Bei AlFaClu arbeitet das FBH als Mitglied des ZEMI (Zentrum für Mikrosystemtechnik Berlin) mit zwei Hamburger Universitäten zusammen.

## Development of system devices – the Prototype Engineering Group at FBH

The transfer of research results into specific application fields and market-oriented products often requires portable stand-alone devices so that business and research partners can easily test the basic functions. To this effect, the recently established Prototype Engineering Group advances FBH's research results and ensures integration into sample systems. These portable prototypes comprise power supply, sensors, control units, and laboratory electronics, thus miniaturizing laboratory setups.

FBH's manifold research areas set the foundation for a broad range of technical devices, involving all competencies of the institute's departments. This includes:

- pulse laser system comprising picosecond laser and integrated pulse picker
- UV-B LED module for irradiation of a defined area with UV-B light of a specific wavelength
- portable control unit for mobile Raman spectroscopy
- measurement system for high-power pulsed transistor characteristics

The setup of the Prototype Engineering Group is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within "Veriplan". Within the scope of this pilot project, FBH will develop a set of transfer methods, also involving new application fields outside the institute's main subject areas.

The group was established in 2014 after thoroughly analyzing the basic approach. Now, a four-member team bundles know-how in mechanical design, electronic engineering, and software interfaces. Devices are tested and optimized in the newly equipped electronic laboratory.

The independently acting Prototype Engineering Group is part of the Science Management Department, providing services for all scientific departments of the institute. The team ensures that research components are integrated ready to use. Together with the institute's scientific staff, the prototype specialists jointly test and verify all device functions in FBH's specialized in-house laboratories and workshops.



◀ Ready for use – pulse laser system assembled by the Prototype Engineering Group, comprising the main control unit (left) and the optical component (right).

Betriebsbereit – PulsLasersystem mit Steuereinheit (links) und optischer Komponente (rechts), das vom Entwicklungszentrum montiert wurde.

At the same time, the prototype team works on modularizing components and standardizing engineering procedures. The workflow is organized by professional project management for efficient resource planning and scheduling.

Such systematic device engineering strengthens FBH's engineering expertise and supports the scientific activities of the institute. This way, development processes shall be accelerated considerably.

## Weiterentwicklung bis zum Prototypen: das Entwicklungszentrum am FBH

Der Transfer von Forschungsergebnissen in spezielle Anwendungsgebiete und markt-gerechte Produkte erfordert häufig tragbare autonome Geräte, an denen Unternehmen und Forschungspartner die wesentlichen Funktionen testen können. Das neu gegründete Entwicklungszentrum entwickelt FBH-Forschungsergebnisse weiter und integriert sie in Mustersysteme. In die handhabbaren Prototypen werden dann Stromversorgung, Sensoren, Steuergeräte und Laborelektronik integriert. Dadurch können Laboraufbauten miniaturisiert werden.

Aufgrund der vielfältigen Forschungsbereiche des FBH ist bereits eine große Bandbreite an technischen Geräten in Vorbereitung – mit Kompetenzen, die abteilungsübergreifend in die Komponenten einfließen:

- Puls-Laser-System mit Pikosekundenlaser und integriertem Pulspicker
- UV-B-LED-Modul zur Bestrahlung einer Fläche mit Licht spezifischer Wellenlänge
- portable Ansteuerung für mobile Raman-Spektroskopie
- Messgerät für leistungsstarke gepulste Transistorkennlinien

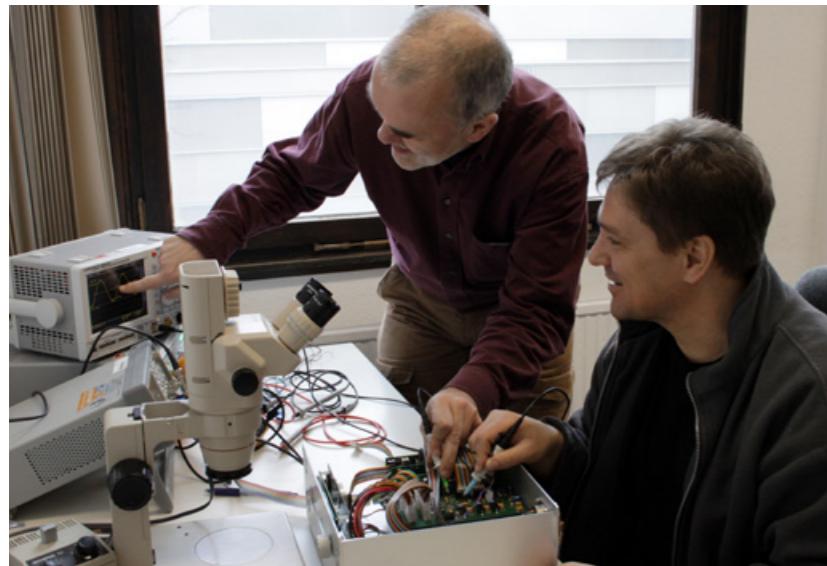
Der Aufbau des Entwicklungszentrums wird im Rahmen des Pilotprojekts „Veriplan“ vom BMBF gefördert. Das FBH wird im Projekt einen Methodenkasten für die Verwertung entwickeln und erproben, der auch fachfremde Applikationsgebiete mit einbezieht.

In 2014 wurde dazu das grundsätzliche Vorgehen analysiert und die Arbeitsgruppe gegründet. Ein vierköpfiges Ingenieursteam bündelt nun Kompetenzen in der mechanischen Konstruktion, in der Elektronik-Entwicklung und Softwareanbindung. Die Geräte werden im eigenen Elektronik-Labor in Betrieb genommen und optimiert.

Die eigenständige Arbeitsgruppe ist in der Abteilung Wissenschaftsmanagement angesiedelt, die Dienstleistungen für alle Fachabteilungen des Instituts bietet. Das Entwicklungszentrum arbeitet in enger Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern, um die komplexen Forschungsmodule funktionsfähig zu integrieren. Zusätzlich werden die Funktionen in den hochspezialisierten Institutslaboren und Werkstätten überprüft.

Angestrebt ist, die dabei verwendeten Komponenten zu modularisieren und Entwicklungsprozesse zu standardisieren. Wobei alle Abläufe von einem professionellen Projektmanagement zur effizienten Ressourcenplanung und termingerechten Fertigstellung gesteuert werden.

Der systematisierte Gerätebau baut somit zugleich das Engineering-Know-how am FBH aus und ergänzt die wissenschaftlichen Aktivitäten. Entwicklungsprozesse sollen dadurch erheblich beschleunigt werden.



< Where the pieces come together – prototype specialists constructing a pulse laser system.

Hier laufen die Fäden zusammen – Konstrukteure des Entwicklungszentrums beim Aufbau eines Puls-Laser-Systems.

Microwave Components  
& Systems

Mikrowellenkomponenten  
& -systeme

Business Areas & Research

Geschäftsbereiche & Forschung

## Microwave Components & Systems Mikrowellenkomponenten & -systeme

Die Forschungsarbeiten des FBH im Bereich der Mikro- und Millimeterwellen zielen darauf, die Grenzen der elektronischen Bauteile hinsichtlich effizienter Leistungserzeugung bei hohen Frequenzen systematisch zu erweitern. Dies geschieht mithilfe der III/V-Halbleitertechnologie und gliedert sich in drei Forschungslinien:

- Die Effizienz der Leistungserzeugung im Mikrowellenbereich weiter zu steigern, speziell in den Frequenzbändern, die für die drahtlose Kommunikationsinfrastruktur genutzt werden. Basis dafür ist die GaN-Technologie. Dies umfasst insbesondere neuartige Architekturen wie den digitalen Mikrowellen-Leistungsverstärker.
- Die verfügbare Ausgangsleistung im Frequenzbereich oberhalb 100 GHz bis (momentan) 250 GHz zu erhöhen. Dies beruht auf einem Transfer-Substrat-Prozess mit InP-Heterobipolartransistoren und beinhaltet auch eine InP-auf-BiCMOS-Heterointegration auf Waferebene, die gemeinsam mit dem Leibniz-Institut IHP entwickelt wurde.
- Die Anwendung von plasmonischen Effekten für die Terahertz-Detektion und -Emission zu erkunden. Diese Phänomene versprechen eine Einsatzmöglichkeit von Transistorstrukturen weit oberhalb der klassischen Grenzfrequenzen im 1 THz-Bereich. Wir nutzen dazu die GaN-Technologie.

Neben der III/V-Halbleitertechnologie erfordern diese Forschungsarbeiten die entsprechende Expertise bei Simulation, Design und Charakterisierung. Diese ist am FBH verfügbar und wird kontinuierlich weiterentwickelt. Eine umfangreiche Messtechnik ermöglicht die Charakterisierung der Bauelemente bis zu Frequenzen von 500 bzw. 750 GHz. Somit stellt das FBH die gesamte Wertschöpfungskette bereit, von Epitaxie und Prozessierung bis zu Design, Mess- und Aufbautechnik.

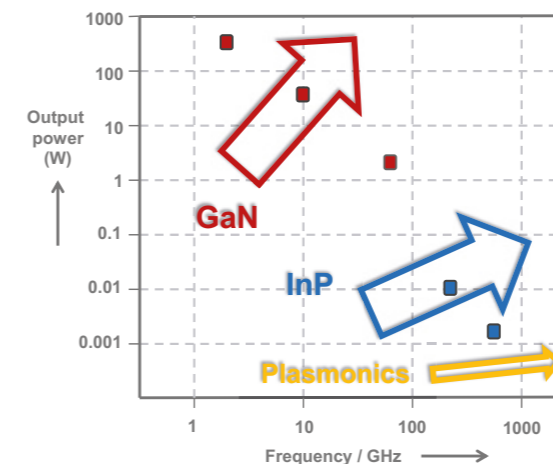
Die Forschungsarbeiten adressieren Schlüsselkomponenten für die drahtlose Kommunikationsinfrastruktur, wie Basisstationen für die Mobilkommunikation, sowie für Radar- und bildgebende Systeme. Darüber hinaus nutzt das FBH seine Kompetenz auf dem Gebiet der Komponenten, um einzigartige System-Funktionsblöcke für spezielle Anwendungen zu entwickeln. Im Einzelnen umfasst das FBH-Forschungs-Portfolio die folgenden Themen:

- Diskrete GaN-Hochleistungs-Transistoren (HEMTs) und -MMICs für Frequenzen von 1 bis 20 GHz und den Leistungsbereich von 10 bis 100 W, einschließlich robuster rauscharmer GaN-MMIC-Verstärker,
- Auf dem Weg zum digitalen Mikrowellen-Leistungsverstärker: Klasse-S-Module mit GaN-Leistungs-MMICs für den Frequenzbereich 1...2 GHz,
- InP-HBT-MMICs für Betriebsfrequenzen bis 250 GHz und darüber, auf AlN-Substrat und als InP-auf-CMOS-Lösung,
- GaN-basierte Bauelemente für plasmonische Detektion und Emission bei THz-Frequenzen,
- Kompakte integrierte Mikrowellen-Quellen zur Plasmaerzeugung im 2 GHz-Bereich,
- Schnelle Treiber für Leistungs-Laserdioden und elektro-optische Modulatoren.

Die zugehörigen GaN- und InP-Prozesse werden von den Technologieabteilungen des FBH beziehungsweise dem Geschäftsbereich GaN-Elektronik entwickelt und gepflegt. Reinraumlabore mit industriekompatiblen Gerätepark ermöglichen es, Bauelemente auf dem neuesten Stand der Technik herzustellen.

FBH activities in the microwave and mm-wave field have a clear overall target: pushing the limits of electronic devices with regard to power and efficiency at high frequencies. The developments are based on III-V semiconductor technology and pursued in three areas:

- Advancing the power-efficiency performance at microwave frequencies, particularly in the bands used for the wireless infrastructure. This relies on gallium nitride (GaN) components and focuses on the development of novel microwave power amplifier (PA) architectures such as the digital microwave PA.
- Increasing the available output powers for frequencies beyond 100 GHz up to, so far, 250 GHz, by using indium phosphide (InP) bipolar transistors (HBTs). A transferred-substrate process is applied including a wafer-scale InP-on-BiCMOS heterointegration option, which has been developed with the Leibniz institute IHP.
- Exploring plasmonic effects for THz detection and emission. 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 use GaN as semiconductor for these developments.



Besides the III-V semiconductor technologies, these activities require the corresponding advanced simulation, design, and measurement expertise, which is available at FBH and continuously developed further. Dedicated measurement equipment allows characterization for frequencies up to 500 GHz and 750 GHz, respectively. This way, the FBH offers the entire value-added chain from epitaxy and processing to computer-aided design, measurements, and packaging.

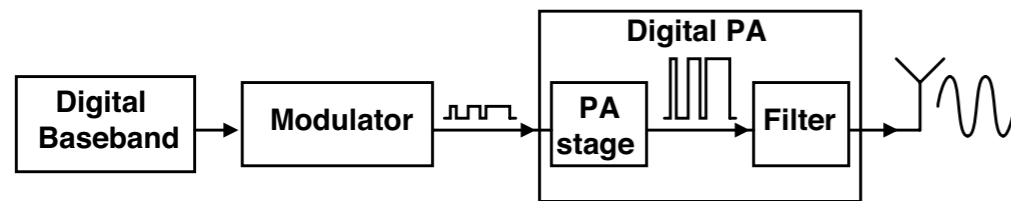
FBH research work addresses key components for the wireless communications infrastructure, such as cellular radio base-stations, and for radar and imaging systems. Beyond this, the institute's competence is used in components to develop unique system function blocks for special applications. In more detail, the FBH research portfolio comprises the following topics:

- GaN high-power discrete transistors (HEMTs) and MMICs for 1 to 20 GHz with 10 to 100 W output power; this covers also robust low-noise GaN amplifier MMICs,
- Towards the digital microwave PA: S-class modules with GaN MMICs for the 1...2 GHz frequency range,
- InP-HBT MMICs for operation at frequencies of 100 GHz and beyond, on AlN substrate and as InP-on-BiCMOS solution,
- GaN-based devices for plasmonic detection and emission of THz frequencies,
- Compact integrated microwave sources for microplasma generation in the 2 GHz range,
- High-speed drivers for power laser diodes and for electro-optical modulators.

The relevant GaN and InP processes are developed and maintained by FBH's technology departments and the GaN Electronics Business Area, respectively. Cleanroom laboratories with industry-level equipment offer the capabilities required for state-of-the-art device performance.

## Progress in the field of digital power amplifiers

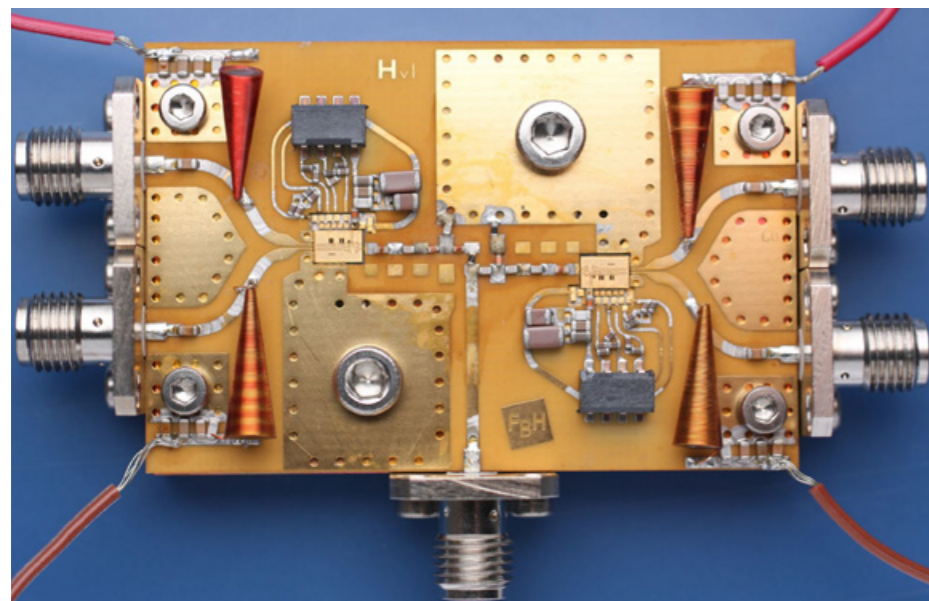
The continuous developments in the field of modern mobile communication put ever-increasing demands on the infrastructure with regard to high flexibility, low cost, and high efficiency. Today, the base station transmitter chain is realized almost completely digitally except for one key part, the radio-frequency (RF) power amplifier (PA). Making the PA digital as well would simplify architecture, add flexibility, and reduce cost, particularly for the future network scenarios with a multitude of picocells and femtocells. Fig. 1 shows the block diagram of a complete digital transmitter architecture: the digital baseband signal is modulated into a binary bit stream using a dedicated modulator (e.g., band-pass or envelope delta-sigma modulator). The bit sequence is then amplified in amplitude by the digital PA stage. The filter at the output reconstructs the wanted analog signal.



◀ Fig. 1. Block diagram of digital transmitter architecture including digital PA.

Using versatile building blocks with multi-band capabilities is a must in the digital power amplifier design. Presently, the only suitable candidates for such a digital PA are amplifiers of the class-D/S type. In 2014, FBH continued its activities in this field and developed new GaN power switch MMICs suitable as building blocks for various power amplifier modules with an increased digital content, targeting future LTE base station transmitters. Along with the high-speed power switches the class-S approach requires very compact, high-Q, and broadband impedance-optimized reconstruction filters at the output. Therefore, in collaboration with Prof. Ian Hunter at the University of Leeds (UK), a compact third-order high-Q filter for the 1.8 GHz band has been realized.

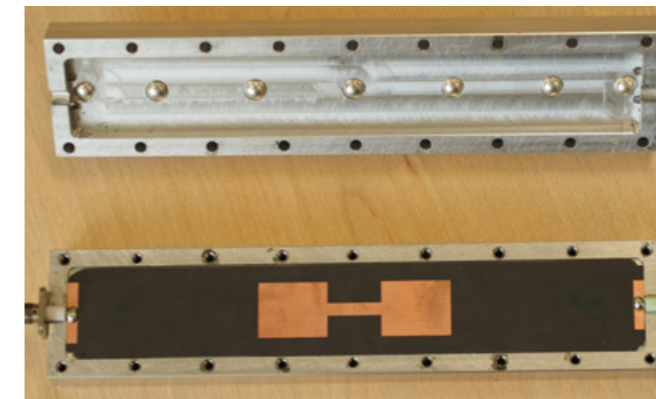
The MMIC power switch contains a high-gain broadband voltage-mode PA and was used to realize several class-D/S PAs: The first tri-band amplifier of class-S type for 0.8/1.8/2.6 GHz band as well as an H-bridge and a single-chip class-D/S PA for the 800 MHz band. Maximum output powers of 14 W and final-stage drain efficiencies ( $n_{\text{drain}}$ ) up to 90 % have been reached. With a TTL-level input voltage swing of only 0.4 V<sub>pp</sub> a large-signal gain of 40 dB can be reached. Moreover, by applying the digital Doherty concept to the H-bridge PA



◀ Fig. 2. H-bridge class-D/S power amplifier for the 800 MHz band.

(Fig. 2), high  $n_{\text{drain}}$  values of 75 % and 40 % at 6 dB and 12 dB peak-to-average power ratio (PAPR) are achieved, respectively. The results demonstrate the benefits of the digital PA approach in realizing various circuit types with the same IC by just changing the periphery.

The high-Q filter optimized for digital PA applications (Fig. 3) in the 1.8 GHz band is realized with a suspended substrate stripline approach. It achieves an insertion loss of 0.4 dB and a 3 dB bandwidth of 150 MHz. More important for a proper class-D/S amplifier operation are the input-impedance characteristics of the filter, which must meet specifications over a multi-octave bandwidth. Thus, a dedicated design approach has been successfully developed at FBH satisfying the requirements of class-D/S PA operation. For the targeted application of a voltage-mode class-D/S power amplifier, depending on the final-stage GaN HEMT size, an optimum input impedance  $Z_{\text{opt}}$  is realized at signal frequency while a relatively high impedance is required out of band.



◀ Fig. 3. Compact third-order suspended-substrate stripline filter for the 1.8 GHz band.

Bis auf die Hochfrequenz-Leistungsverstärker (HF-PA) ist heutzutage die gesamte Übertragungskette in Mobilfunkbasisstationen komplett digital ausgeführt. Digitale HF-PAs würden demnach die Systemarchitektur nicht nur vereinfachen, sondern auch flexibler und kostengünstiger machen – besonders im Hinblick auf zukünftige Netzwerkszenarien. Daher hat das FBH 2014 einen neuartigen 4-stufigen digitalen GaN-Leistungsschalter-MMIC entwickelt. Damit wurden verschiedene Leistungsverstärker, darunter ein Tri-Band Klasse-D/S-Verstärker für 0,8/1,8/2,6 GHz, ein digitaler Doherty-PA und ein Klasse-D/S-PA für 800 MHz realisiert, um die Vorteile des digitalen PA-Konzepts zu demonstrieren. Mit 0,4 V<sub>pp</sub> Eingangshub wurden Ausgangsleistungen bis 14 W, 40 dB Verstärkung und bei Betrieb von 6 dB/12 dB unterhalb der Volllaststeuerung Effizienzen von 75 % und 40 % erreicht. Passend zu den schnellen Leistungsschaltern werden sehr kompakte, hochgütige und breitbandig Impedanzangepasste Filterarchitekturen benötigt. Ein erstes hochgütiges Filter 3. Ordnung für das 1,8 GHz-Band wurde hierfür in Zusammenarbeit mit Prof. Ian Hunter von der britischen University of Leeds entwickelt. Das Filter zeigt eine 3 dB Bandbreite von 150 MHz, eine Einfügungsdämpfung von 0,4 dB und realisiert breitbandig die für den PA-Betrieb nötige Impedanzcharakteristik.

### Publications

A. Wentzel, M. Martinez-Mendoza, W. Heinrich, "A Compact Tri-Band Voltage-Mode Class-D/S PA for Future 0.8/1.8/2.6 GHz LTE Picocell Applications", accepted for publication in Proc. of 45th European Microwave Conference (EuMC) 2015, Paris, France (2015).

A. Wentzel, S. Chevchenko, P. Kurpas, W. Heinrich, "A Flexible GaN MMIC Enabling Digital Power Amplifiers for the Future Wireless Infrastructure", accepted for publication in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (2015).



# Circuit design and characterization for THz frequencies – building blocks for transmitter and receiver modules

The FBH has successfully developed a family of microwave monolithic integrated circuit (MMIC) technologies for the W-band frequency range and beyond. These technologies are based on indium phosphide (InP) double heterojunction bipolar transistors (DHBT), comprising a transferred-substrate (TS) process, InP-on-BiCMOS DHBTs realized in collaboration with the Leibniz institute IHP, for further details please go to p. 118, and an InP-on-diamond process. These currently reach cut-off frequencies around 350 GHz, cut-off frequencies over 700 GHz are under development. In principle, MMIC design at FBH is based on proprietary large-signal HBT device models including thermal effects and MMIC design kits for all processes.

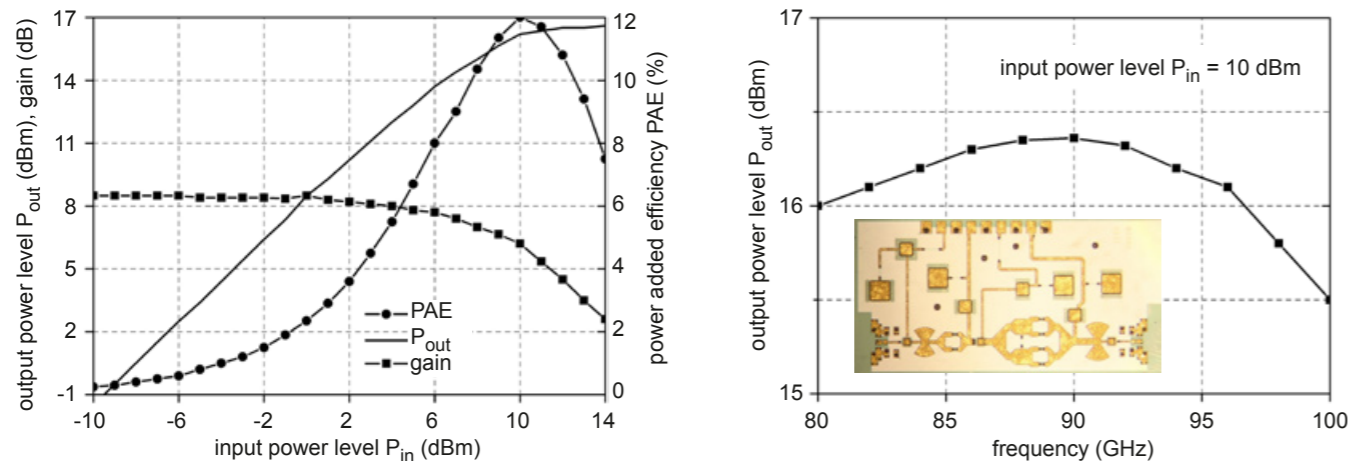


Fig. 1. 90 GHz power amplifier MMIC (chip photo, power characteristics, and S parameters).

InP HBT technology combines high breakdown voltage with high speed and thus offers excellent output power capabilities at high frequencies. Therefore, FBH MMIC activities focus on signal generation and amplification, which are key building blocks for transmitter and receiver modules in THz systems.

As part of the BMBF- and DLR-funded project MIMIRAWA, FBH develops transmitter and receiver chipsets for satellite tracking and imaging. The transceiver system employs FBH's TS InP DHBT MMIC process for W-band front-end module components such as mixers, low noise amplifiers, and power amplifiers. In the 75 - 110 GHz range, the low-noise amplifiers exhibit flat gain of 20 dB and 30 dB, respectively, with a predicted noise figure of less than 8 dB. The power amplifier shown in Fig. 1 operates at around 90 GHz with 10 GHz

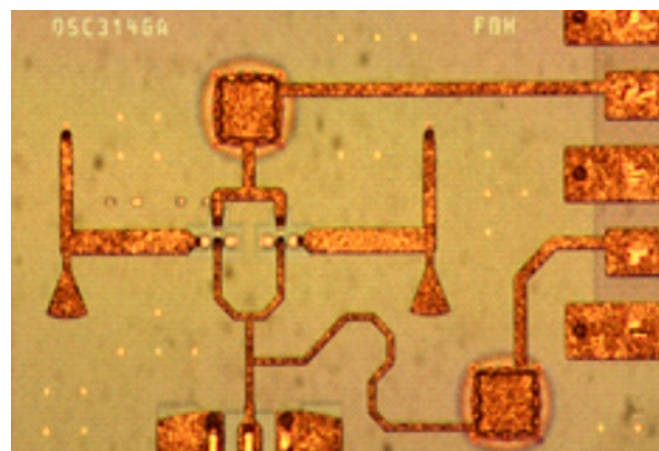


Fig. 2. 270 GHz reflection-type push-push voltage-controlled oscillator.

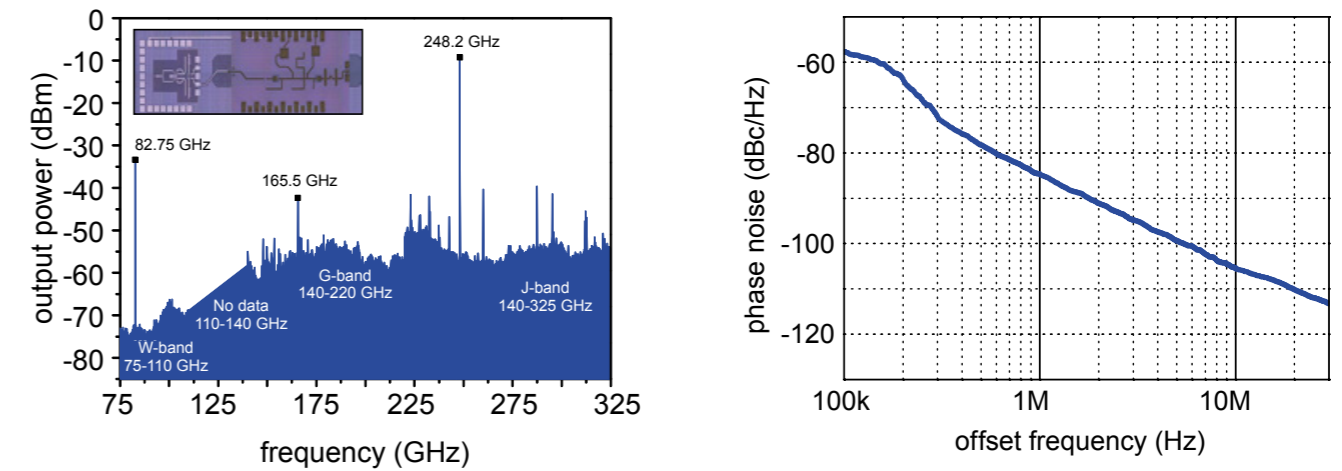
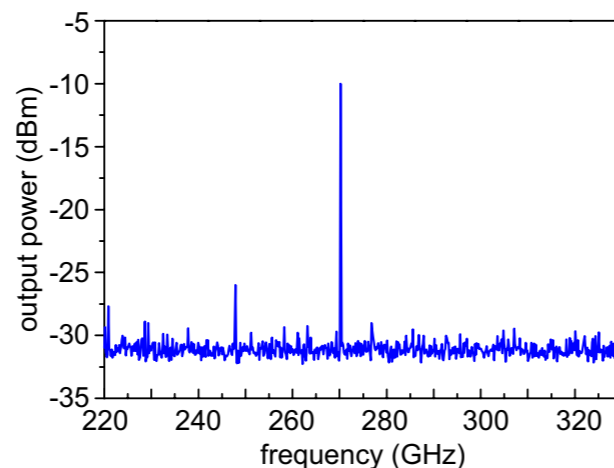


Fig. 3. 250 GHz multiplier signal source using the InP-on-BiCMOS process.

## Publications

Jensen, T. Al-Sawaf, M. Lisker, S. Glisic, M. Elkhoully, T. Krämer, I. Ostermay, C. Meliani, B. Tillack, V. Krozer, W. Heinrich, "Millimeter-wave hetero-integrated sources in InP-on-BiCMOS technology", *Int. Journal Microwave Wireless Technol.*, vol. 6, no. 3/4, pp. 225-233 (2014).

T.K. Johansen, M. Rudolph, T. Jensen, T. Krämer, N. Weimann, F. Schnieder, V. Krozer, W. Heinrich, "Small- and large-signal modeling of InP HBTs in transferred-substrate technology", *Int. J. Microwave Wireless Technol.*, vol. 6, no. 3/4, pp. 243-251 (2014).

M. Hossain, T. Krämer, O. Krüger, V. Krozer, W. Heinrich, "Highly Efficient 200-GHz Fixed-Frequency Fundamental Source in Transferred-Substrate InP DHBT Technology", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Tampa Bay, USA, Jun 1-6, WE2H-5 (2014).

M. Hossain, T. Krämer, I. Ostermay, T. Jensen, B. Janke, Y. Borokhovych, M. Lisker, S. Glisic, M. Elkhoully, J. Borngräber, B. Tillack, C. Meliani, O. Krüger, V. Krozer, W. Heinrich, "A 246 GHz Hetero-Integrated Frequency Source in InP-on-BiCMOS Technology", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 24, no. 7, pp. 469-471 (2014).

M. Hossain, N. Weimann, O. Krüger, V. Krozer, W. Heinrich, "A 270 GHz Push-Push Oscillator in InP-DHBT-on-BiCMOS Technology", *Proc. 44<sup>th</sup> European Microwave Conf. (EuMC 2014)*, Rome, Italy, Oct. 6-9, pp. 588-591 (2014).

V. Krozer, R. Doerner, F.-J. Schmückle, N. Weimann, W. Heinrich, A. Rumiantsev, M. Lisker, B. Tillack, "On-Wafer Small-Signal and Large-Signal Measurements up to Sub-THz Frequencies", *IEEE Bipolar / BiCMOS Circuits and Technology Meeting* Sept. 2014, San Diego (2014).

D.F. Williams, F.-J. Schmückle, R. Doerner, G.N. Phung, U. Arz, W. Heinrich, "Cross-talk corrections for coplanar-waveguide scattering-parameter calibrations", *IEEE Trans. MTT*, vol. 62, no. 8, pp. 1748-1761 (2014).

bandwidth, a small-signal gain of 10 dB, an output power of 18 dBm, and a power-added efficiency of > 20 %.

FBH has developed a number of oscillators and signal sources for transmit and receive modules at frequencies well beyond 100 GHz, using the TS InP DHBT and InP-on-BiCMOS MMIC processes, respectively:

- A 197 GHz fixed-frequency fundamental oscillator with 0 dBm output power and a high DC-to-RF conversion efficiency of 4.5 %.
- A 270 GHz reflection-type push-push oscillator (Fig. 2) with -9 dBm output power.
- Multiplied signal sources were realized in the range from 140 to 250 GHz. In particular, a 250 GHz signal source, which combines a SiGe-BiCMOS VCO with an InP-HBT power amplifier and multiplier and achieves -2 dBm output power and a phase-noise of -85 dBc/Hz at 1 MHz, as illustrated in Fig. 3.

All activities in this field are accompanied at FBH by comprehensive characterization of devices and circuits at THz frequencies, using an automatized on-wafer measurement system up to 500 GHz. FBH develops low-loss interconnects, which exhibit an insertion loss below 0.5 dB @ 200 GHz, as well as calibration standards and methods with predictable performance up to 500 GHz. FBH also cooperates with PTB, NPL, NIST, and industrial partners on calibration hardware and software, leading to verifiable high-accuracy results. Key focus of these activities is to overcome the inherent multi-mode waveguide propagation along with radiation and coupling effects on wafers at frequencies above 50 GHz.

**Für Front-End-Module in Sendern und Empfängern werden am FBH monolithisch-integrierte Schaltkreise entwickelt. Dazu werden MMIC-Technologien, die auf InP-DHBTs basieren, mit Grenzfrequenzen oberhalb von 350 GHz genutzt. Aktuell werden diese auf bis zu 700 GHz weiterentwickelt. Die zugehörigen MMIC-Prozesse sind der InP-DHBT-Transfer-Substrat (TS)-, der InP-auf-BiCMOS- – dieser wird in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut IHP realisiert, siehe auch S. 119 – und der InP-DHBT-Transfer-Diamant-Prozess. Damit wurden Leistungsverstärker mit > 18 dBm Ausgangsleistung bei 90 GHz und einem Leistungswirkungsgrad von über 20 % sowie Fundamental-Oszillatoren bei ~ 200 GHz mit 1 mW Ausgangsleistung realisiert. Außerdem wurden integrierte Signalquellen im InP-auf-BiCMOS-Prozess mit Frequenzen von 250 bzw. 270 GHz, Ausgangsleistungen von -2 dBm bzw. -9 dBm und einem Phasenrauschen von unter -82 dBc/Hz bei 1 MHz Trägerabstand demonstriert.**

## Plasmonic devices for THz detection and emission

The frequency range between 0.6 - 6 THz is of particular interest for focal plane THz cameras and THz spectroscopy systems. It offers unambiguous spectral "finger-prints" for many substances, including biological matter and organic materials. First arrays with detectors for a focal plane THz camera operating in the frequency range 1 - 2 THz have been realized.

In order to fully explore these applications it is indispensable to develop components with a performance going beyond what is currently available. In particular, the current emitters and detectors are limited in output power and sensitivity, respectively. Plasmonic effects promise a way to overcome the frequency limits of the existing devices. These phenomena are based on plasma waves, which are manifestations of electron density fluctuations in semiconductor structures, e.g., in the two-dimensional electron gas (2DEG) of a gallium nitride (GaN) high-electron-mobility transistor (HEMT).

Ferdinand-Braun-Institut (FBH) and Goethe Universität Frankfurt (GUF) are developing plasmonic devices for THz detection and emission with integrated antenna structures in the frame of the Goethe Leibniz Terahertz Center at GUF. The corresponding structures are based on GaN HEMTs fabricated at FBH. Activities include fundamental work on modelling plasma waves within 2DEG and efficient antenna structures for focal-plane arrays. The main focus of modelling work is to understand the interaction between plasma and electromagnetic waves.

The realization of plasmonic devices is based on the standard FBH GaN-on-SiC monolithic microwave integrated circuit (MMIC) process. The utilized GaN-HEMTs have 0.25  $\mu\text{m}$

gate length and different gate widths between 50  $\mu\text{m}$  and 1  $\mu\text{m}$ . The first technology run was a proof of concept, obtaining first quantitative results for plasmonic detection in GaN. For the subsequent technology runs a suitable layout was developed with a well-defined RF environment for the devices ensuring transistor stability from DC to the maximum frequency of oscillation  $f_{\text{max}}$ , as well as DC decoupling. This is particularly important for the emitter case to separate plasmonic emission from conventional oscillation phenomena.

On the antenna side, bow-tie and logarithmic spiral antennas for the frequency range from 500 GHz to 2.2 THz have been designed, aiming to facilitate coupling of the free-space signals to the detectors and emitters. The real part of the feed-point impedance is about 100  $\Omega$  for the bow-tie antenna and 75  $\Omega$  for the logarithmic spiral antenna. One wing of the antenna is a MIM capacitor between the transistor's gate and source contact. The antenna structures are directly integrated with the GaN HEMT devices, which affects the antenna feed-point impedance due to the transistor's finite size. The THz radiation is coupled to the antenna through the SiC substrate and focused by means of substrate silicon (Si) lenses. Fig. 1 illustrates a cross-section of the antenna and the fully assembled MMIC with a printed circuit board (PCB) for DC connection and sensing. A photograph of a fabricated array of detectors is shown in Fig. 2, where the MMIC is mounted on a highly resistive Si wafer. The best results regarding THz detection have been achieved with structure A3 [see Fig. 2 first row, third structure].

Measurement results for detectors in the frequency range from 0.497 THz to 0.743 THz are presented in Fig. 3. The left part shows voltage responsivity versus gate voltage based on the total power at the reference plane. At

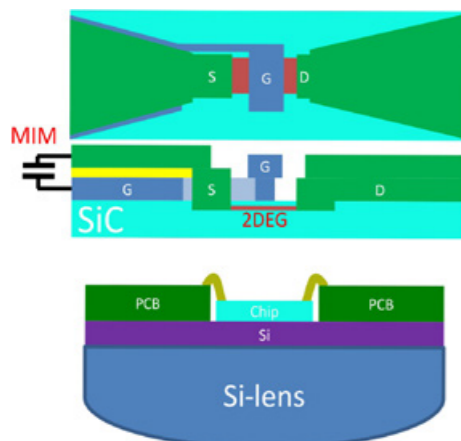


Fig. 1. GaN HEMT with antenna (top view and cross-section) and fully assembled MMIC with Si lens.

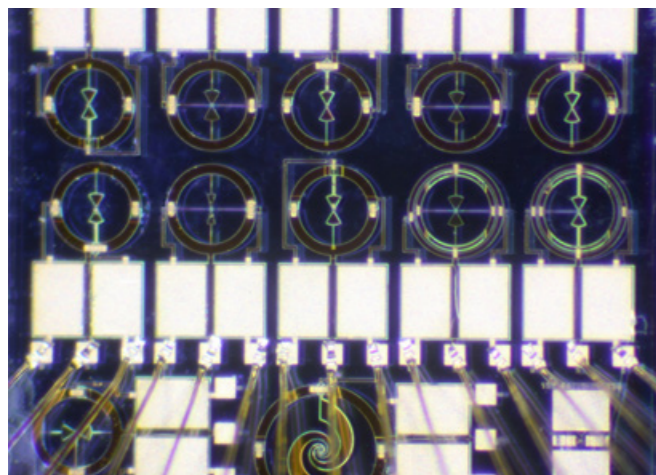


Fig. 2. MMIC mounted on a high-resistivity Si wafer.

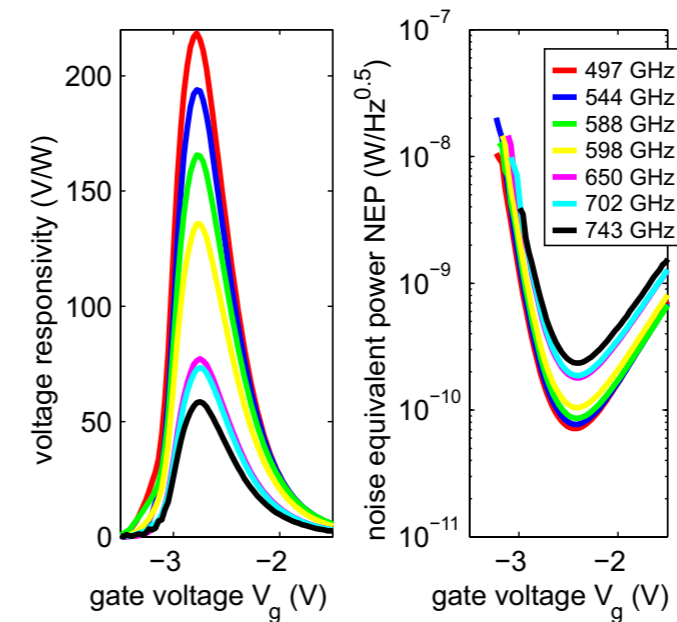


Fig. 3. Measurement results for responsivity (l.) and noise-equivalent power (r.) for device A3 as a function of applied gate voltage.

0.479 THz and -2.6 V gate voltage the responsivity value is 218 V/W. Noise equivalent power (NEP) versus gate voltage is plotted on the right-hand side of Fig. 3. At 0.479 THz, the NEP value reaches 72 pW/Hz. These values represent conservative data because they are based on the total radiated power, which is higher than the power actually coupled into the device.

Observation of THz emission from plasmonic operation of GaN HEMT is currently limited by thermal effects and is subject of ongoing fundamental research on this topic. It is expected that further improvement of the antenna properties together with modifications of the GaN transistor devices will provide an order of magnitude enhancement of the detector properties.

Um den THz Frequenzbereich oberhalb von 0,7 THz für industrielle Anwendungen zugänglich zu machen, entwickelt das Ferdinand-Braun-Institut gemeinsam mit der Goethe Universität Frankfurt plasmonische Bauelemente. Hierfür werden Ladungsträger-Dichte-Wellen (Plasmonen) entlang des zwei-dimensionalen Elektronengases (2DEG) in Galliumnitrid (GaN)-HEMT-Transistoren genutzt. Ein Kernpunkt der Forschung besteht darin, effiziente Detektoren und Emissionsbauelemente im THz-Bereich mit integrierten Antennen zu realisieren. Dazu werden plasmonische Bauelemente auf Grundlage des GaN-MMIC-Prozesses am FBH gefertigt und vermessen. Die Modellbildung der Plasmonen im 2DEG erweitert zugleich das theoretische Verständnis. Bei den bisher gefertigten THz-Detektoren konnten State-of-the-Art-Empfindlichkeits- und NEP-Werte erreicht werden (siehe Abb. 3). Mithilfe dieser grundlegenden Arbeiten wird es möglich sein, den THz-Frequenzbereich mit integrierter Elektronik für Focal-Plane-Systeme zu erschließen. Dadurch eröffnen sich neue industrielle Anwendungsfelder, die vorher aufgrund des hohen Kostenaufwandes nicht sinnvoll schienen oder durch die fehlende Integrationsfähigkeit unzugänglich waren.

### Publications

S. Boppel, M. Ragauskas, A. Hajo, M. Bauer, A. Lisauskas, S. Chevtchenko, A. Rämmer, I. Kasalynas, G. Valusis, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, V. Krozer, H.G. Roskos, "Terahertz edge detection with antenna-coupled field-effect transistors in 0.25  $\mu\text{m}$  AlGaIn/GaN technology", Sept. 2014, 39<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRM-MW-THz) [2014].

M. Bauer, A. Lisauskas, S. Boppel, M. Mundt, V. Krozer, H.G. Roskos, S. Chevtchenko, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, "Bow-tie-antenna-coupled terahertz detectors using AlGaIn/GaN field-effect transistors with 0.25 micrometer gate length", 2013 European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Nürnberg, Germany, pp. 212-215 [2013].

## Drivers for high-power pulsed laser sources

Short optical pulses with widths in the range from 500 ps to 3 ns along with high response speed, high peak power, and good beam quality are highly demanded in many fields. These include LIDAR, free-space communications, metrology, medical and biotechnology applications, material processing, and frequency doubling. In LIDAR applications, for instance, the pulse width determines spatial resolution, implying that 1 ns corresponds to 15 cm resolution.

Gain switching, i.e., turning on and off the current injected into the active section of a semiconductor-based device like a laser diode, offers a simple, cost-effective, and power-efficient possibility to generate such optical pulses in the ns range. A particular challenge is to achieve short switching times as currents exceeding 20 A peak must be switched. Hence, a key element of such pulsed laser sources is the driver circuit. It is particularly demanding to combine high peak current with fast switching. All the more since the laser diode represents a highly reactive non-50 ohms load. GaN transistors are well known to offer benefits for microwave devices if high power together with high-voltage operation is required. However, due to the high 2D electron density, GaN is also capable of providing large output currents for a given transistor size. In the end, GaN transistors offer a current density at least twice as high (i.e., 1 - 2 A/mm) as that of GaAs, with switching speeds at least one third those of GaAs.

Which challenges arise for the circuit design of the driver?

1. Pulse widths with the related slew rates in the 100 ps range can be realized with ECL (Emitter Coupled Logic) circuits only. Both the low output voltages of ECL and the necessary high input voltage of the final-stage transistors require an additional voltage amplifying stage.
2. For shortest pulses we have to pay particular attention to the parasitic components of the laser diode. The capacitive part of the laser diode impedance must be small enough, with an RC time constant less than 1/10 that of the required pulse width. However, this requirement is not easily realized with the laser diode design only. The diffusion capacitance reduces the effective diode current especially in the switch-on moment. Increasing the total current can only partly compensate this effect. A detailed simulation of the circuitry (SPICE) together with the physical simulation of the laser diode (TeSCA - WIAS) are necessary in order to capture all effects.
3. For short switching times and high currents a careful decoupling of the input and output circuits of the switching stages, particularly of the final stage, is indispensable.

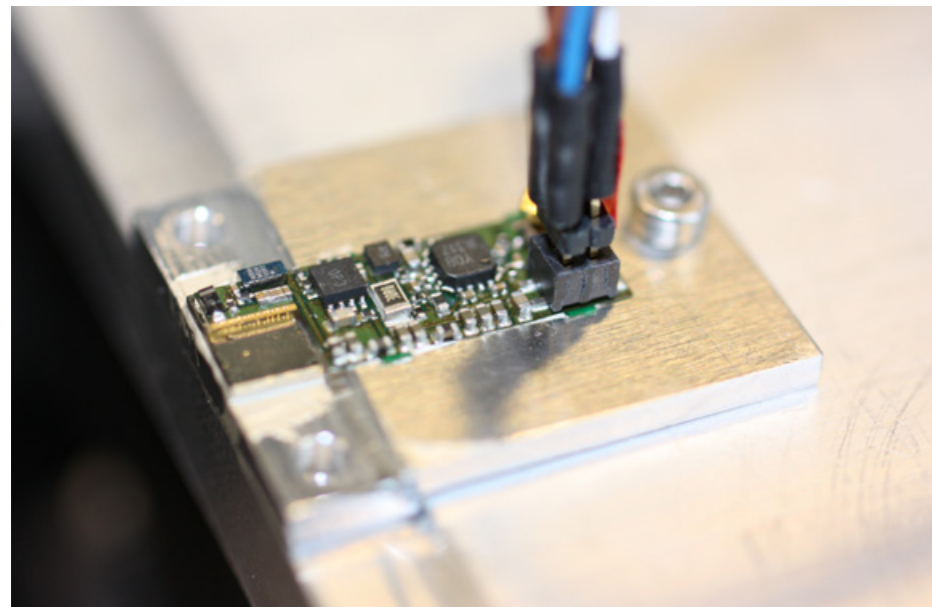


Fig. 1. Assembly of laser diode driver with laser diode.

To avoid critical voltage drops the output circuit has to be designed with low inductance. This is done by proper design of the circuit interconnection lines, the wire bondings, and of the printed circuit material. Fig. 1 shows an example of such a driver with a laser diode, which is a result of simulations, design, and also some redesign cycles.

An 808 nm ridge-waveguide (RW) laser based on a GaAsP single quantum well embedded in an asymmetric AlGaAs waveguide with a super-large optical cavity has been investigated. It results in a narrow vertical divergence of about 15° (FWHM). The ridge width is 4.4 μm and the cavity length 3.9 mm. The laser diode is mounted on an in-house developed high-frequency unit, electrically driven by nearly rectangular shaped current pulses with 2 ns length and a repetition frequency of 1 MHz.

Fig. 2 shows the measured time-domain behavior of the current pulse with an amplitude of about 13 A (red curve) and the generated optical pulse (blue curve). The first part of the current pulse has a width of about 2 ns (FWHM). After 2.8 ns the current changes its sign, i.e., the current flows out of the laser diode. In other words, some part of the injected electrons and holes move back to their corresponding contacts without recombining in the device. The optical pulse has a width of 2.3 ns (FWHM) and a peak power of 5.1 W. The inset shows the evolution of the lateral intensity profile measured with a streak camera.

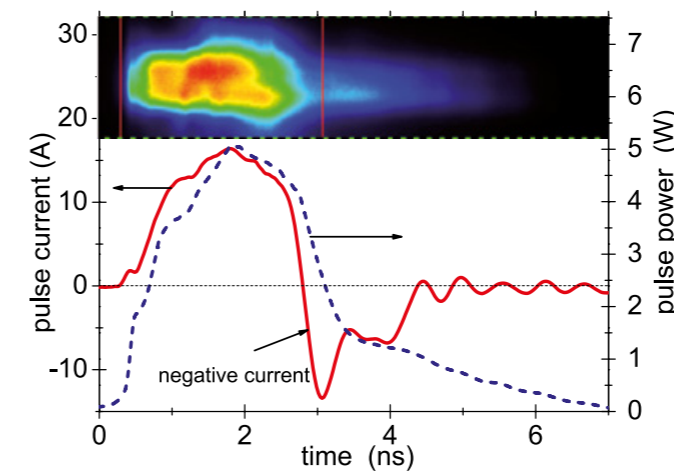


Fig. 2. Temporal shape of the measured current pulse and the generated optical pulse. Inset: Temporal evolution of the lateral near field intensity profile (horizontal axis: time, vertical axis: position).

Kurze optische Pulse mit Pulsbreiten im Bereich von 500 ps bis 3 ns und hoher Wiederholrate, hoher Leistung und guter Strahlqualität sind in vielen Anwendungen gefragt. Zu diesen gehören etwa LIDAR, Freifeldkommunikation, Metrologie, Medizin, Biotechnologie, Materialbearbeitung und Frequenzverdopplung. Will man optische Pulsleistungen von einigen Watt in diesen kurzen Zeiten erreichen, müssen Laserdioden mit Impulsspitzenströmen von bis zu 20 A angesteuert werden. Um die geforderten hohen Ströme schnell schalten zu können, werden GaN-Transistoren in der Treiberendstufe eingesetzt. Durch eine Optimierung aller Faktoren – von der Wahl der Logikfamilie und des Leiterplattenmaterials bis hin zum simulationsunterstützten Design der Schaltung und der Laserdioden – konnten mit dem neu entwickelten Aufbau elektrische Impulse von 13 A mit einer Pulsbreite von nur 2,3 ns erzeugt werden. Bei Ansteuerung von Stegwellenleiter-Laserdioden mit einer Emissionsbreite von 4 μm wurden mit dieser Treiberschaltung optische Impulse mit einer Spitzenleistung von 5,1 W und guter Strahlqualität erreicht.

### Publication

Th. Hoffmann, A. Klehr, A. Liero, G. Erbert, W. Heinrich, „Compact high-current diode laser nanosecond-pulse source with high efficiency and 13 μJ output energy“, *Electr. Lett* vol. 51 no. 1, pp. 83-85 (2015).

For further information:



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

# GaN Electronics

## *GaN-Elektronik*

**Business Areas & Research**  
Geschäftsbereiche & Forschung

## GaN Electronics GaN-Elektronik

Die Schwerpunkte der Arbeiten des Geschäftsbereichs GaN-Elektronik liegen auf Galliumnitrid (GaN)-Bauelementen für Anwendungen in der Mikrowellentechnik und Leistungselektronik. Zu den Aktivitäten gehören die Bauelementkonzeption, die Entwicklung und Optimierung von geeigneten Prozessmodulen sowie deren Integration in einen Gesamtprozess. Die Entwicklungen decken die gesamte Wertschöpfungskette ab: von Bauelementsimulation und -Design, Epitaxie, Prozesstechnologie und Charakterisierung bis hin zum fertig montierten, lieferfähigen Bauelement. Hinzu kommen Lebensdauermessungen und die Analyse potenzieller Ausfallmechanismen. Die Arbeiten erfolgen in Abstimmung mit allen beteiligten Abteilungen und Geschäftsbereichen.

National geförderte Forschungsprojekte und direkte Industrieprojekte unterstützen diese Arbeiten. Vermehrt profitiert der Geschäftsbereich von europäischen Förderprogrammen, die es ermöglichen, State-of-the-Art-Resultate zu erreichen. So wurden in dem vom FBH koordinierten europäischen HiPoSwitch-Projekt, das Anfang 2015 abgeschlossen wird, mit einer Erhöhung des dynamischen On-State-Widerstands um lediglich 25 % bei 600 V Schaltbetrieb international konkurrenzfähige Ergebnisse erzielt. Im Rahmen des EU-geförderten Projekts GaNSAT wurden die technologischen Voraussetzungen zur Realisierung von Ka-Band-MMICs im 30 GHz-Bereich für die weltraumgestützte Kommunikation geschaffen.

Im Bereich der GaN-Mikrowellenelektronik verfügt das FBH über zwei abrufbare Prozessvarianten: eine zur Realisierung von diskreten GaN-Mikrowellentransistoren für Leistungsverstärker im Bereich des L-, S- und C-Bands in 0,5 µm Gatetechnologie, die andere ermöglicht monolithisch-integrierte Mikrowellenschaltkreise (MMIC) im X-Band basierend auf einem 0,25 µm GaN-MMIC-Prozess. Ein weiterer derartiger Prozess für Schaltkreise im Ka-Band-Bereich mit 0,1 µm Gatelänge befindet sich in der Erprobungsphase. Die GaN-MMIC-Prozesse bilden die technologische Basis für die Realisierung einer Vielfalt von Schaltungsdesigns. Diese Designs kommen sowohl aus dem FBH als auch von Projektpartnern und werden auf Multiprojekt-Wafern realisiert. Dazu gehören mehrstufige X-Band-Leistungs-MMICs, Schaltverstärker und robuste rauscharme Verstärker.

Im Bereich der GaN-Leistungselektronik wurden selbstsperrende Schalttransistoren für hohe Sperrspannungen bei gleichzeitig geringen Einschaltwiderständen signifikant weiterentwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Optimierung von dynamischen Effekten. Damit konnte jetzt ein praktisch ideales Schaltverhalten bei einer Betriebsspannung von 600 V erreicht werden. Entsprechende Transistoren wurden in Kooperation mit Infineon Technologies Austria in induktivitätsarme Gehäuse montiert und Projektpartnern für die Systemerprobung geliefert. Quasi-vertikale Transistoren erweitern die bestehende Technologie und wurden erfolgreich demonstriert. Sie bieten eine wichtige technologische Voraussetzung für die monolithische Integration von Halb- oder Vollbrücken für die Energiekonversion.

Zuverlässigkeitsuntersuchungen und die Identifikation von Degradationsmechanismen begleiten alle Entwicklungen und fließen iterativ in die Optimierung der Bauelementprozesse ein. Die Messverfahren bestehen aus On-Wafer-Screenings sowie thermisch aktivierten DC- und RF-Langzeittests. Zur Analyse der Ausfallmechanismen kooperiert das FBH europaweit eng mit verschiedenen Forschungsinstitutionen.

Zudem ist Ende 2013 das „Joint Lab Power Electronics“ erfolgreich angelaufen, eine Kooperation zwischen der Technischen Universität Berlin und dem FBH. Erste vielversprechende Ergebnisse liegen vor. Gemeinsam soll mit einer aufeinander angepassten Bauelemente-Technologie und Schaltungskonzepten das Potenzial von GaN-Leistungsbaulementen noch besser ausgeschöpft werden.

The Business Area GaN Electronics researches and develops gallium nitride (GaN) devices for microwave and power electronic applications. Activities comprise device design, development and optimization of corresponding process modules, and their integration into a complete process flow. They are covering the full value chain, from device simulation and design, to epitaxy, processing technology, and characterization up to the packaged devices that are reproducibly available for delivery to customers. Lifetime measurements and the analysis of potential degradation mechanisms are complementing this work. All activities are realized by intensive interaction with all contributing departments and business areas.

A variety of projects, both nationally and industrially funded, are substantially supporting FBH's R&D work. Additional funding is increasingly coming from collaborative European projects enabling FBH to achieve state-of-the-art results. Within the HiPoSwitch project coordinated by the FBH, for example, internationally competitive results have been achieved by enhancing the dynamic on-state resistance by only 25 % at 600 V switching operation. In the frame of the GaNSAT project, the technological prerequisites towards Ka-band GaN MMICs for space-borne communication systems operating around 30 GHz were successfully developed.

To realize discrete and monolithic-integrated microwave devices based on GaN, two basic process versions are available at FBH: one relies on a 0.5 µm GaN technology for discrete L-, S-, and C-band, the other enables X-band GaN MMICs in 0.25 µm gate technology. A further GaN MMIC process targeting Ka-band circuits based on GaN transistors in 0.1 µm gate technology has been developed and is currently being tested. These MMIC processes are forming the technological backbone for a multitude of circuit developments including multistage X-band power amplifiers, switch-mode amplifiers, and robust low-noise switch-mode amplifiers.

In the field of GaN power electronics, high-voltage normally-off transistors for high blocking voltages, low on-state resistivity, and optimized dynamic properties have been significantly advanced. The technological improvements led to 600 V power switching devices with ideal switching behavior. The accordingly optimized devices were mounted in low-inductance packages by Infineon Technologies Austria and then delivered to project partners for implementation in energy converting demonstrator systems. As an extension of the above mentioned technology, quasi-vertical transistors with either the source or the drain contact connected to the substrate have been successfully demonstrated. They are an important prerequisite for any further monolithic integration of power switching transistors to half and full bridge arrangements used for energy conversion.

Reliability characterizations combined with identification of degradation mechanisms are part of all developments and iteratively fed back into technological development cycles. Reliability testing techniques comprise on-wafer screenings and long-term thermally accelerated DC and RF lifetime tests. The FBH additionally cooperates with various research institutions in Europe regarding analysis of degradation mechanisms.

Moreover, FBH and Technische Universität Berlin have successfully started their Joint Lab Power Electronics at the end of 2013, leading to promising initial results. The partners aim at jointly exploiting the potential of GaN power switching technology by directly adjusting device technology and power switching circuit technology to each other.

## GaN X-band process for multi-project MMIC designs

Reproducible GaN-based heterojunction field effect transistor (HFET) technology enables the realization of broadband high-power amplifiers and highly efficient amplifier concepts. These include class D, E, F, Doherty, envelope-tracking, and further techniques. As a baseline technology for realizing multi-project monolithic microwave integrated circuit (MMIC) designs, a highly reproducible X-band HFET process is maintained and further developed at FBH. We use this process for in-house MMIC designs and for external customers placing designs on this particular process. Typical MMICs realized are X-band power and low-noise amplifiers (LNA) as well as GaN-based voltage-mode (VM) digital power amplifier MMICs. Furthermore, antenna-coupled field effect transistors optimized for THz power detection (TeraFETs) according to the plasmonic detection principle open up new possibilities for this technology. Fig. 1 shows an example of a processed multi-project wafer.

Key component for the successful and reproducible realization of such MMIC designs is the AlGaIn/GaN HFET, which is, according to the requirements of multi-project MMIC designs, available in different layouts. The GaN X-band process at FBH relies on co-planar transistors with 250 nm gate length which are embedded and encapsulated in SiN<sub>x</sub> layers. The transistor layouts vary in terms of total gate width, pitch, and periphery. Large periphery transistors with gate widths of 8 × 125 μm and 12 × 125 μm are used for the power stages of X-band MMICs. The designs of LNA and voltage-mode PAs are based on transistors with smaller periphery of 2 × 125 μm, 4 × 125 μm,

and 4 × 250 μm. The dimensions of the antenna-coupled TeraFETs are significantly smaller, down to a gate width of only 3 μm. All types of transistors exist in versions with and without field plates. The field plates are realized either as extension of the gate head or as additional metallization connected to the source contact, as shown in Fig. 2. A typical epitaxial structure consists of GaN:Si cap, Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N barrier, and a GaN:Fe buffer grown on 4-inch semi-insulating SiC substrate. The epitaxial structures have been designed for optimum microwave performance of the transistors, i.e., output power, PAE, and linear gain.

To fabricate reliable and low-cost MMICs generally requires high yield of both transistors and passive elements, such as resistors, metal-insulator-metal (MIM) capacitors, and inductors. To a large extent, the quality of the epitaxial structure and the gate technology determines transistor functionality and reproducibility. In terms of passive MMIC components the breakdown field strength of MIM capacitors may strongly depend on specific technological process parameters. Most jeopardizing factors in this regard have been identified by systematic investigations. Accordingly, the process has then been optimized without introducing additional process steps.

The stability and reproducibility of the X-band process is monitored by a carefully selected combination of on-wafer DC and microwave measurements, which are kept constant for statistical process data evaluation. Typical results of load-pull at 2 GHz and V<sub>DS</sub> = 28 V for transistors 2 × 125 μm are: P<sub>out max</sub> = 4.6 W/mm (optimum match for maximum power and quiescent current of ~ 30 % of I<sub>DS max</sub>) and PAE = 71 % (optimum match for maximum power added efficiency and quiescent current of ~ 10 % of I<sub>DS max</sub>). Typical results of load-pull at 10 GHz and V<sub>DS</sub> = 35 V for 8 × 125 μm transistors are in the range P<sub>out max</sub> = 4.1 - 4.5 W/mm and

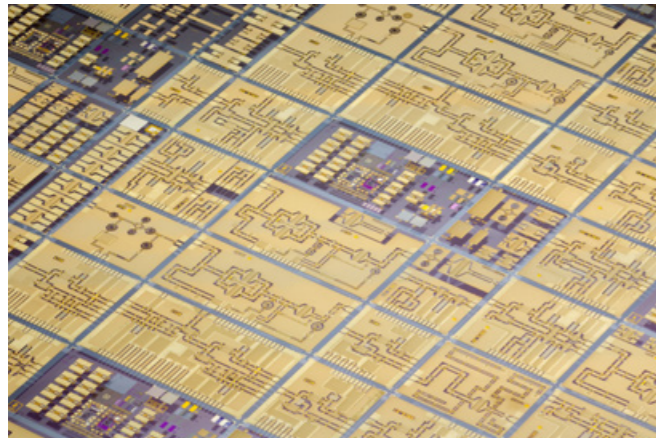


Fig. 1. View of the wafer processed at FBH using GaN X-band technology. The layout contains multi-project MMIC designs, test structures, and transistors.

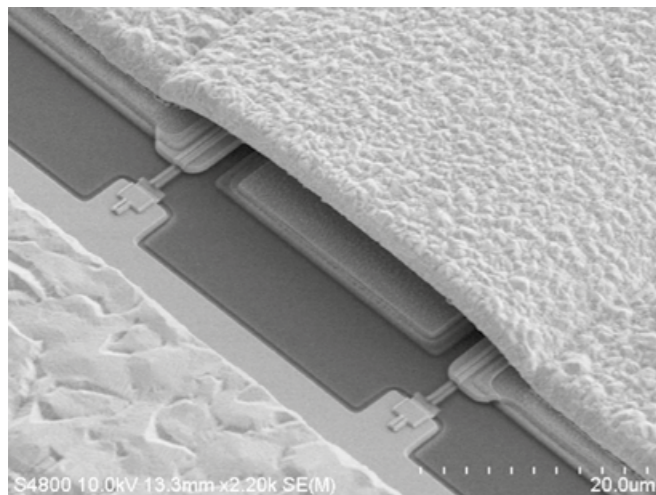


Fig. 2. Detailed view of an X-band GaN-based HEFT with 0.25 μm gate length and source-connected field-plates.

PAE = 49 - 51 %, both measured under optimum match for maximum PAE and quiescent current of ~ 10 % of I<sub>DS max</sub>. The yield achieved in GaN X-band process is in the range of 85 - 95 % for 8 (12) × 125 μm transistors. 94 % of the MIM capacitors (160 × 250 μm<sup>2</sup>) reach a breakdown field strength of more than 5 × 10<sup>8</sup> V/m. The achieved high performance and reproducibility of single elements allow us to produce MMICs of which 70 to 90 % are fully functional, depending on the design complexity.

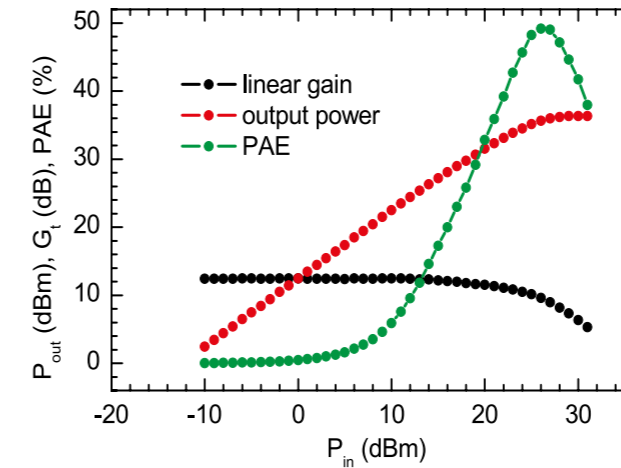


Fig. 3. Exemplary load-pull measurement for 8 × 125 μm wide transistor delivering P<sub>out</sub> = 36.38 dBm (4.3 W), PAE = 50 %, and G<sub>1</sub> = 12.5 dB at 10 GHz. Measurements were conducted at V<sub>DS</sub> = 35 V under optimum matching conditions for efficiency and at a quiescent current of ~ 10 % of I<sub>DS max</sub>.

Am FBH werden Multiprojekt-Wafer nach kundenspezifischen Designs realisiert. Dafür nutzen wir unseren reproduzierbar verfügbaren, stetig weiterentwickelten 0,25 μm GaN-MMIC-Prozess. Typische Multiprojekt-Layouts beinhalten Leistungsverstärker, rauscharme Verstärker, digitale Schaltverstärker sowie spezielle, antennengekoppelte Feldeffekttransistoren für die Detektion von THz-Strahlung (TeraFETs). Schlüsselbauelemente in allen MMICs sind AlGaIn/GaN-Heterojunction-FETs, die mit hoher Ausbeute verfügbar sind. Die FBH-Designbibliothek enthält Transistoren verschiedenster Größenklassen, die umfassende Schaltungskonzepte ermöglicht. Je nach Komplexität der Schaltungen liegt deren Ausbeute zwischen 70 % und 90 % und die der aktiven Bauelemente bei bis zu 95 %. Aufeinander abgestimmte on-wafer DC- und Mikrowellenmessungen erfassen die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Prozesses. Mithilfe von Transfer- und Ausgangskennlinien, gepulst gemessenen Kennlinien sowie Mikrowellenleistungsmessungen (Load-Pull) bei 2 GHz und 10 GHz wird die Qualität des Prozesses umfassend charakterisiert. Load-Pull-Messungen an 8 × 125 μm Transistoren demonstrieren bei 10 GHz State-of-the-Art Mikrowellen-Leistungsdichten von typischerweise 4,3 W/mm bei einer Effizienz von mehr als 51 % (Klasse AB-Betrieb).

### Publications

S. Boppel, M. Ragauskas, A. Hajo, M. Bauer, A. Lisauskas, S. Chevtchenko, A. Rämer, I. Kašalynas, G. Valušis, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, V. Krozer, H.G. Roskos, "Terahertz Edge Detection with Antenna-Coupled Field-Effect Transistors in 0.25 μm AlGaIn/GaN Technology", Proc. Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves (IRMMW-THz 2014), Tuscon, USA, M4/A-1 (2014).

E. Ersoy, S. Chevtchenko, P. Kurpas, W. Heinrich, "Potential of Coplanar X-band GaN-MMIC Power Amplifiers", Frequenz, vol. 68, no. 9-10, pp. 407-413 (2014).

S. A. Chevtchenko, S. Freyer, L. Weixelbaum, P. Kurpas, J. Würfl, "Yield Improvement of Metal-Insulator-Metal Capacitors in MMIC Fabrication Process Based on AlGaIn/GaN HFETs", Proc. Int. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS ManTech 2014), USA, pp. 131-134 (2014).

## Progress of Ka-band GaN MMIC development

Ka-band GaN MMICs are gaining considerable interest for high data rate satellite links. In the frame of the European FP7 project GaNSAT FBH develops K- and Ka-band MMICs for powering beam steering satellite transceivers. The project consortium jointly develops K-band amplifiers (about 20 GHz) for the satellite downlink and Ka-band low-noise amplifiers (around 30 GHz) for the satellite-borne receivers.

Despite the relatively high maturity of GaN technology, the development of performance-optimized Ka-band PA and LNA MMICs requires simultaneous handling of contradictory technical demands. For example, the gate-to-channel distance has to be decreased for short gate transistors to avoid short channel effects. However, this usually leads to a reduced electron concentration in the channel. An increased Al concentration in the barrier may compensate this effect; on the other hand, increasing the Al concentration beyond a certain threshold compromises the crystalline quality of the AlGaIn layer and subsequently leads to reduced transistor reliability. In order to find the optimal combination of epitaxial structure and gate length in terms of output power density, power added efficiency, and noise figure, two types of epitaxial structures have been analyzed (Fig. 1). They are equal in terms of barrier and cap layer design, but differ in the buffer composition.

According to DC measurements the epitaxial structure with GaN:Fe buffer layer (Fig. 1a) has a higher drain current density as compared to the epitaxial structure with an AlGaIn back barrier (Fig. 1b) [ $\sim 1.0$  A/mm and  $\sim 0.7$  A/mm, respectively]. Accordingly, the maximum achieved output power, gain, and power-added-efficiency show quite competitive results (Fig. 2). Load-pull measurements at 18 GHz and 28 V drain bias tuned for maximum output power  $P_{out}$  demonstrate a power density of  $\sim 3$  W/mm at a PAE of  $\sim 45$  %. Devices fabricated on an epitaxial structure with AlGaIn back barrier showed lower performance in terms of  $P_{out}$ , PAE, and gain.

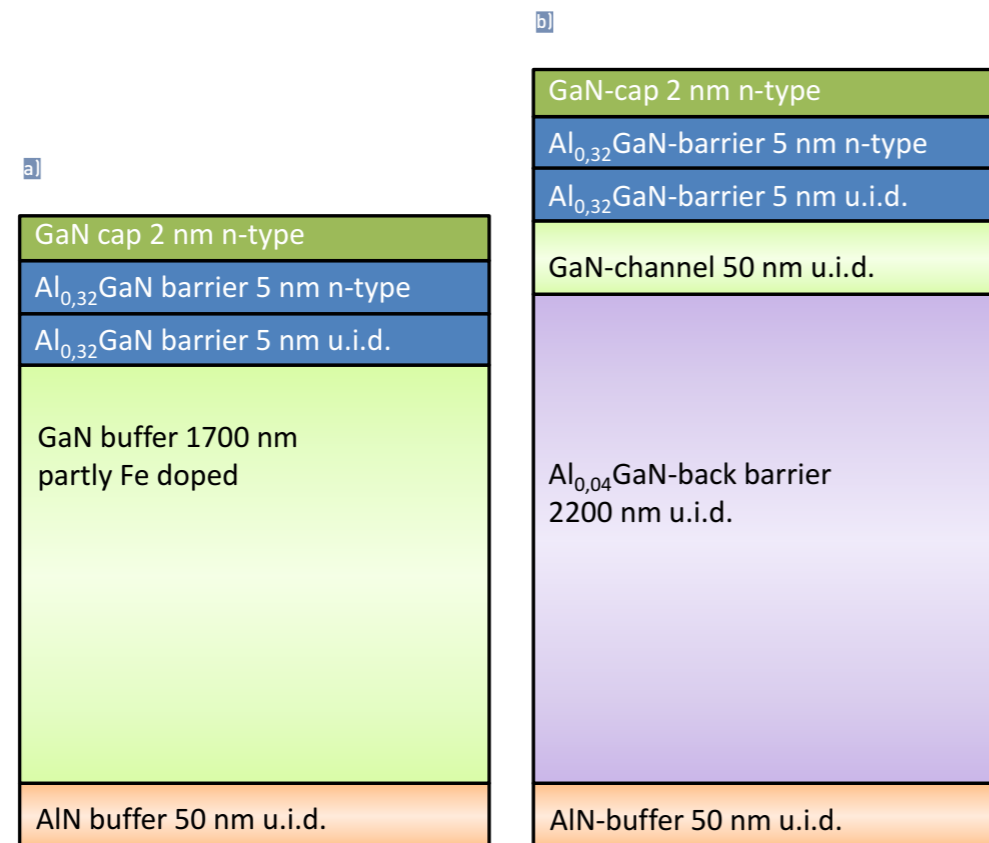


Fig. 1. Epitaxial structures used for Ka-band power applications (a) and low-noise Ka-band applications (b).

Fig. 3 compares the RF noise performance of transistors fabricated on epitaxial structures according to Fig. 1. When fabricated on the wafer with AlGaIn back barrier, the noise performance is better as compared to transistors on the wafer with GaN:Fe buffer. The noise measurements data, extrapolated up to 30 GHz reveal a noise figure of 1.9 dB for the wafer with AlGaIn back and 2.2 dB for the wafer with GaN:Fe buffer. The corresponding associated gain at 30 GHz is 7.3 dB and 6.4 dB, respectively. The performed experiment unveiled that the epitaxial structure with AlGaIn back barrier provides better pinch-off and lower drain current as compared to the epitaxial structure with GaN:Fe buffer. As a consequence, better noise figure was obtained on wafers with AlGaIn back barrier, while better power performance was achieved using wafers with GaN:Fe buffer.

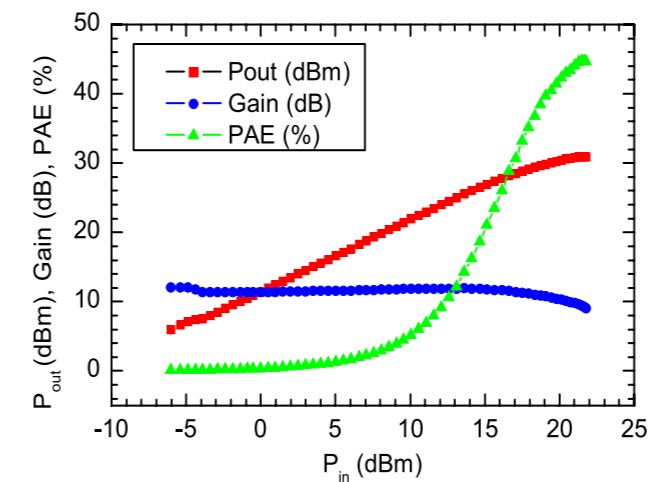


Fig. 2. Load-pull measurement results of  $4 \times 75 \mu\text{m}$  wide transistors fabricated on-wafer with GaN:Fe buffer (@ 18 GHz,  $V_{DS} = 28$  V, tune for max  $P_{out}$ ).

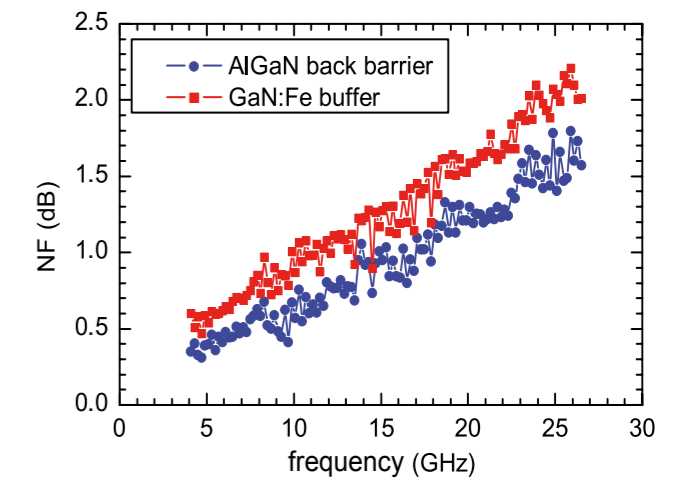


Fig. 3. Noise figure measurement results (@ 4.1 to 26.5 GHz) for  $4 \times 75 \mu\text{m}$  wide transistors fabricated on-wafer with GaN:Fe buffer (red) and AlGaIn back barrier (black).

Satellitenverbindungen mit hohen Datenraten erfordern schnelle Transceiver im K- und Ka-Band. Mit GaN-Transistoren lassen sich sehr kompakte und leichte Mikrowellenverstärker realisieren, beispielsweise für aktiv gesteuerte Antennen im K- und Ka-Band. Zur Entwicklung der zugehörigen GaN-HEMTs sind viele, teils widersprüchliche technologische Erfordernisse aufeinander abzustimmen. Insbesondere die Epitaxiestruktur und der laterale Transistoraufbau von Ka-Band-MMICs müssen sehr präzise optimiert werden. Dafür wurden unterschiedliche Epitaxiekonzepte und Transistor-Layouts kombiniert und die Eigenschaften von Mikrowellen-Leistungszellen und Strukturen für rauscharme Verstärkerkonzepte systematisch miteinander verglichen. Epitaxiekonzepte mit Eisen-dotiertem Puffer und angepasster AlGaIn-Barrierendicke eignen sich demnach sehr gut für Band-Leistungsverstärker im Bereich von 20 GHz, während Schichtstrukturen mit einer zusätzlichen AlGaIn-Barriere im Puffer sehr deutliche Vorteile für rauscharme Ka-Band Verstärker bringen.

### Publications

K. Y. Osipov, S. A. Chevtchenko, O. Bengtsson, P. Kurpas, F. Brunner, N. Kemf, J. Würfl, G. Tränkle, "Current Dispersion in Short Channel Al<sub>0.32</sub>Ga<sub>0.68</sub>N/GaN HEMTs", Proc. Int. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS ManTech 2015), USA, pp. 269-272 (2015).

K. Y. Osipov, S. A. Chevtchenko, O. Bengtsson, P. Kurpas, F. Brunner, N. Kemf and J. Würfl, "Implementation of slanted sidewall gates technology in the fabrication of S-, X-, and Ka-band AlGaIn/GaN HEMTs", Proc. Int. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS ManTech 2014), USA, pp. 189-192 (2014).

## High-voltage low-dispersive normally-off GaN switches

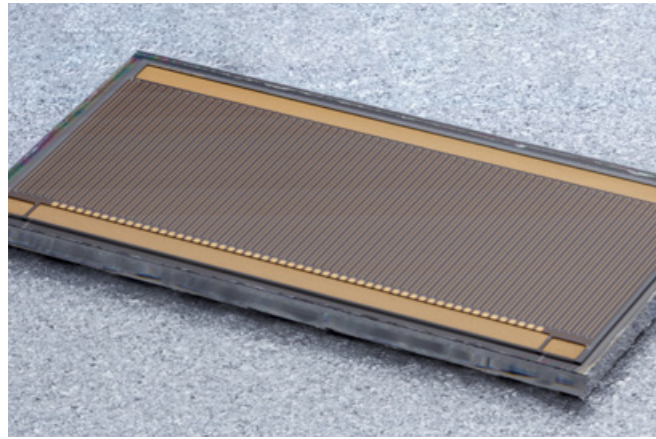


Fig. 1. 60 mΩ / 600 V GaN switching transistor chip (4.4 x 2.3 mm<sup>2</sup>) with 214 mm gate width.

High-voltage gallium nitride (GaN) based power switching transistors enable efficient power converters with increased power density. High converter switching frequencies can be realized with lateral GaN-based HFETs due to the low area-specific on-state resistance for a given blocking strength and the low gate charge required for switching. We have successfully developed GaN-based 60 mΩ / 600 V normally-off GaN switching transistors. With 600 V blocking strength they are applicable for most converter applications using the domestic power grid. They even outperform state-of-the-art Si-based superjunction MOSFETs in terms of smaller chip area, less gate charge for switching, and lower internal switching losses.

We have produced these devices on 3-inch SiC substrates with GaN- and AlGaN-based semiconductor layers grown by MOCVD. The transistor chip features a lateral

dimension of 4.4 x 2.3 mm<sup>2</sup> and 214 mm gate width. An iron-doped GaN-buffer (GaN:Fe) is introduced for sufficient isolation in device off-state. The normally-off device characteristic is realized by using a p-type doped GaN stripe, which is utilized as gate to convert the normally-on characteristic of a lateral GaN HFET to normally-off. The output characteristic of the 60 mΩ / 600 V transistors shows a maximum saturated pulse current of 117 A at a gate bias of  $V_{GS} = 5$  V (on-state). The transistor is already closed at a gate bias of  $V_{GS} = 1$  V or less.

Many GaN power devices are prone to adverse dynamic switching effects: High internal electric fields combined with high GaN material dislocation densities lead to device charging when applying high off-state drain voltages in the order of several 100 volts. The resulting increased dynamic on-state resistance  $R_{ON}$  has found to be a major challenge when developing high-voltage GaN transistors. It generates additional on-state losses for switching applications and may compromise the principle advantages of GaN-based switches. The actual devices are practically free from dynamic effects. According to measurements performed

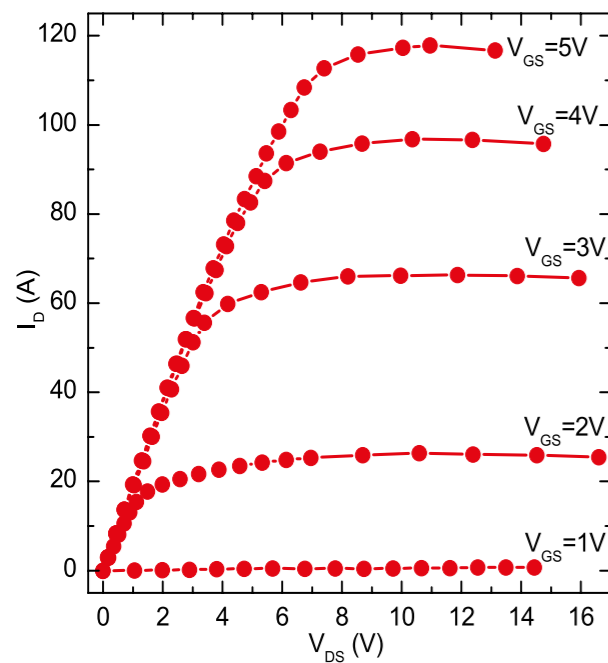


Fig. 2. Pulsed output characteristic of a transistor according to Fig. 1 showing 117 A maximum current and off-state properties for 1 V gate bias.

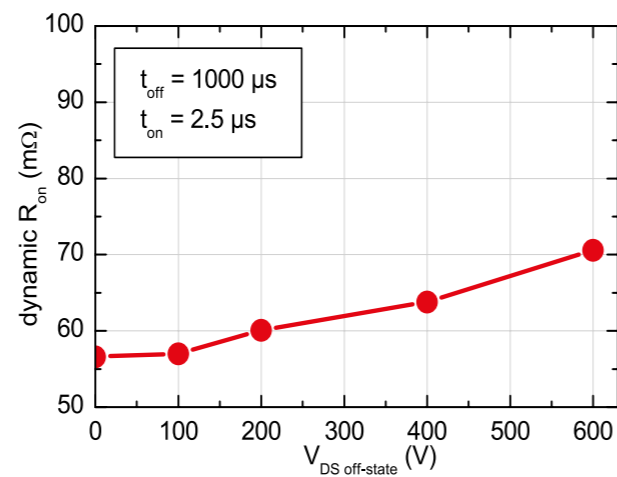


Fig. 3. Dynamic on-state resistance of a transistor according to Fig. 1 for different off-state drain voltages. The off-state bias was applied for 1000  $\mu$ s and  $R_{ON}$  was determined 2.5  $\mu$ s after switching.

2.5  $\mu$ s after switching from 600 V off-state to 5 A on-state, the dynamic  $R_{ON}$  is increased by 25 % only from 57 mΩ to 71 mΩ as measured. Thus, the GaN-specific advantages over Si-based devices remain valid even under high-voltage switching conditions.

Additionally, we have performed switching experiments up to 650 V with smaller versions (2.1 mm and 3.2 mm gate width) of switching transistors. The switching transient on-state voltage drop allows a dynamic  $R_{ON}$  determination. A comparison of the relative dynamic  $R_{ON}$  for the different epitaxial buffer structures while switching 400 V as function of the ambient temperature up to 150°C demonstrates the significant impact of the GaN buffer composition on device dispersion.

Devices with a carbon-doped (GaN:C) buffer and a composite buffer generally show a higher increase of the dynamic  $R_{ON}$  for high-voltage switching as compared to the GaN:Fe buffer devices. The dynamic  $R_{ON}$  for the GaN:C buffer devices doubles with temperature between 25°C and 150°C. In contrast, an increase by only 30 % was found for the composite buffer and the GaN:Fe buffer. Efficient high-voltage switching at room temperature and at elevated temperatures up to 150°C can thus be realized with GaN switches based on a GaN:Fe buffer structure.

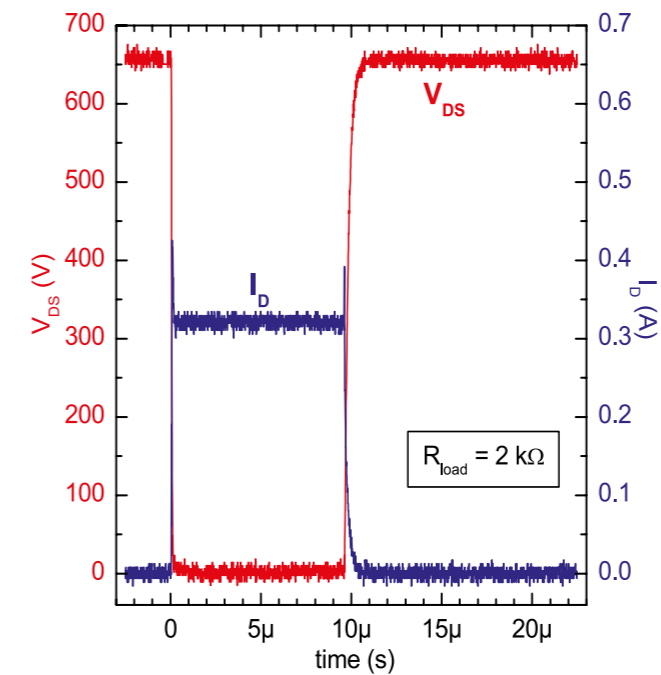


Fig. 4. 650 V / 0.3 A switching transient with a smaller transistor according to Fig. 1, having only 3.2 mm gate width. The set-up uses a 2 kΩ resistive load.

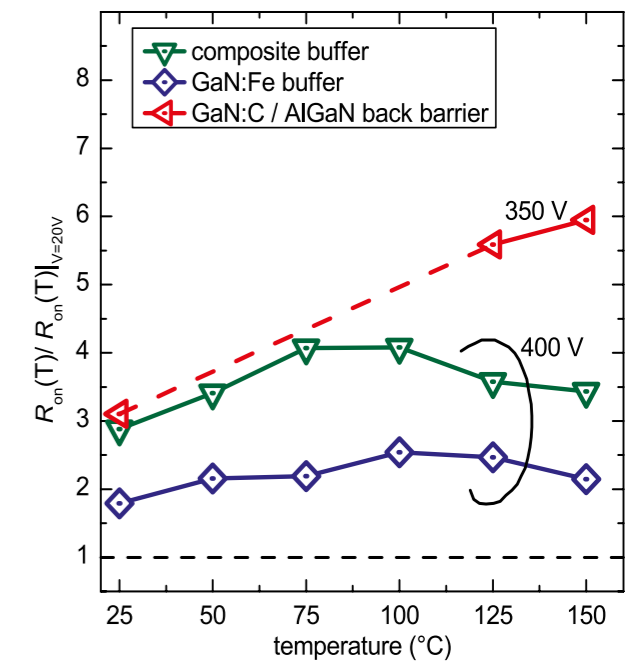


Fig. 5. Relative dynamic on state resistance extracted from switching transients at 350 V or 400 V as function of the temperature for devices from the three different GaN buffer structures.

### Publications

O. Hilt, R. Zhytnytska, J. Boecker, E. Bahat-Treidel, F. Brunner, A. Knauer, S. Dieckerhoff, J. Würfl, "70 mΩ / 600 V Normally-off GaN Transistors on SiC and Si Substrates", Proc. 27<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD 2015), China, pp. 237-240 [2015].

E. Bahat-Treidel, O. Hilt, F. Brunner, S. Pyka, J. Würfl, "Systematic study of GaN based power transistors' dynamic onstate resistance at elevated temperatures", Proc. 41<sup>st</sup> Int. Symp. on Compound Semiconductors (ISCS), France [2014].

O. Hilt, E. Bahat-Treidel, F. Brunner, A. Knauer, R. Zhytnytska, P. Kotara, J. Würfl, "Normally-off GaN Transistors for Power Applications", J. Phys.: Conf. Ser., vol. 494, no. 012001, April [2014].

Für Anwendungen in der Leistungselektronik hat das FBH selbstsperrende 60 mΩ / 600 V GaN-Schalttransistoren mit über 110 A Pulsbelastbarkeit und einer Einsatzspannung von 1 V realisiert. Mit einem eisendotierten Puffer ist es uns gelungen, den erhöhten dynamischen Einschaltwiderstand, der bei Hochspannungs-GaN-Transistoren auftritt, sehr niedrig zu halten. Dadurch bleiben die Effizienzvorteile der GaN-Transistortechnologie auch beim Schalten von Spannungen bis 600 V erhalten. Der dynamische Einschaltwiderstand erhöht sich 2.5  $\mu$ s nach dem Einschalten nur um 25 % (von 57 mΩ auf 71 mΩ) wenn die Sperrspannung von 20 V auf 600 V erhöht wird. Für den Einsatz in der Leistungselektronik sind auch die dynamischen Eigenschaften des Transistors bei höheren Betriebstemperaturen wichtig. Während sich bei einem GaN-Puffer mit Kohlenstoffdotierung der dynamische Einschaltwiderstand zwischen 25°C und 150°C noch einmal verdoppelt, beträgt die Erhöhung für den eisendotierten Puffer nur 30 %.



## Joint Lab Power Electronics – bundling expertise

The Joint Lab Power Electronics is a collaborative activity of Ferdinand-Braun-Institut and Technische Universität Berlin (TUB). It combines the respective strengths and know-how in power electronics available at both institutions. The focus is on innovative solutions for electronic power converters by aligning device technology, circuit development, and packaging. Activities specifically aim at fully utilizing the potential of GaN power electronics towards highly efficient, miniaturized, and low-weighted systems. The technology of GaN power devices itself is a core FBH competency, whereas TUB has wide-spread experience in the application of power semiconductor devices, power electronic converters, and specific measurement techniques being adapted to system and circuit requirements. These combined forces with their comprehensive expertise thus cross-fertilize their scientific and technical outcome.

In 2014, Joint Lab activities concentrated on the development of a pulsed measurement setup for the characterization of high-voltage, high-current GaN devices from FBH. With it, a technique for dynamic characterization of GaN power transistors at similar operation conditions as in power electronic converter circuits and the realization of hybrid-integrated GaN-based H-bridges for kW-class DC/DC converters is at hand.

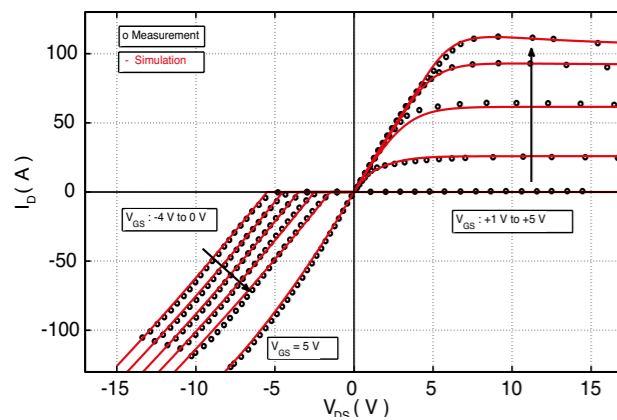


Fig. 1. Simulation and measurements of pulsed output characteristics of a 65 mΩ GaN normally-off transistor operated in forward (1<sup>st</sup> quadrant, standard mode) and reverse direction (3<sup>rd</sup> quadrant); individual data points represent device measurements.

Fig. 1 shows the measured and simulated output characteristic of a normally-off GaN power transistor operated in forward and reverse mode. It demonstrates the principal possibility of building diode-free GaN switches by utilizing the reverse conductivity for current commutation. The switching process in a converter is strongly influenced by parasitic components that are difficult to investigate in a real setup. Therefore, a model of the GaN transistor was developed. The switching process is modeled with a minimized number of additional parasitic components. This model reaches a sufficient match to the measurement (Fig. 2) and enables to investigate parasitic components. It also includes a temperature dependency and a dynamic on-state resistance.

Harnessing of dynamic effects in GaN transistors is one of the most stringent conditions for successfully implementing this technology in future systems. It is therefore important to analyze these properties at conditions as close as possible to device operation in real systems. Thus, in addition to the well-known off-state voltage dependency, the dynamic on-state resistance of normally-off and normally-on GaN HEMTs has been characterized in dependence on the switching frequency and compared to state-of-the-art Si CoolMOS devices. According to Fig. 3 it is evident that the dynamic on-state resistance of GaN devices steps up with increasing switching frequency. It considerably differs from the results obtained from standard double-pulse measurements. Obviously, as the frequency increases

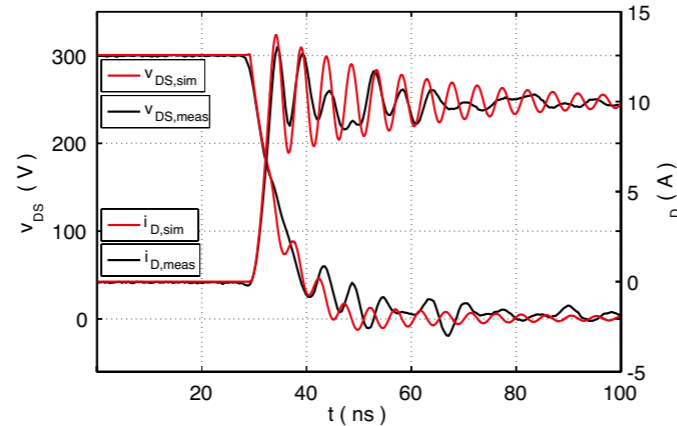


Fig. 2. Comparison between measurement and simulation of a 300 V / 10 A turn-on process.

the steady-state equilibrium between trapping at on-state and de-trapping at off-state saturates at an ever increasing level of dynamic on-state resistance.

The high switching speed of GaN transistors can only be transferred into real systems if all active and passive components are arranged such that inductive loops are minimized as far as possible. This counts for hybrid or even monolithically integrated half and full bridge systems. Fig. 4 (center) shows a hybrid-integrated half-bridge circuit consisting of GaN normally-off transistors and Schottky diodes mounted in a ceramic package. This bridge is continuously operated as DC/DC converter in the water-cooled setup, which further includes specifically designed gate drivers (left side of Fig. 4) and the DC capacitors on the backside. The water cooling system integrates a calorimetric loss measurement that achieves a high accuracy especially for converters with a high efficiency. Up to now, an output power of 500 W and an efficiency of 96 % have been reached.

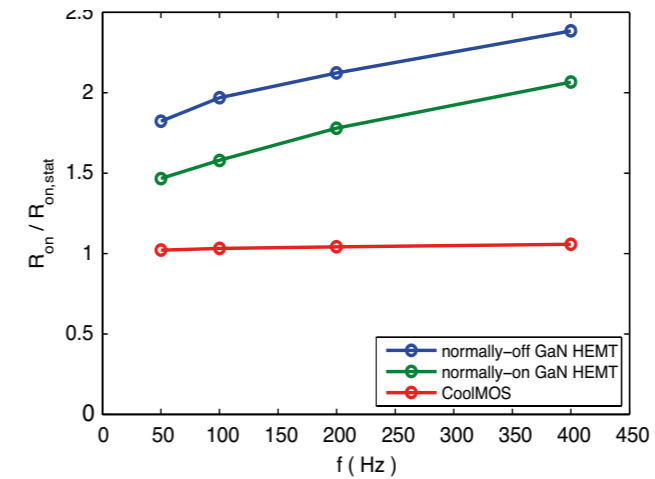


Fig. 3. Comparison of power switching devices by switching experiments at 200 V drain bias – GaN-FETs show an increasing dynamic on-state resistance with switching frequency.

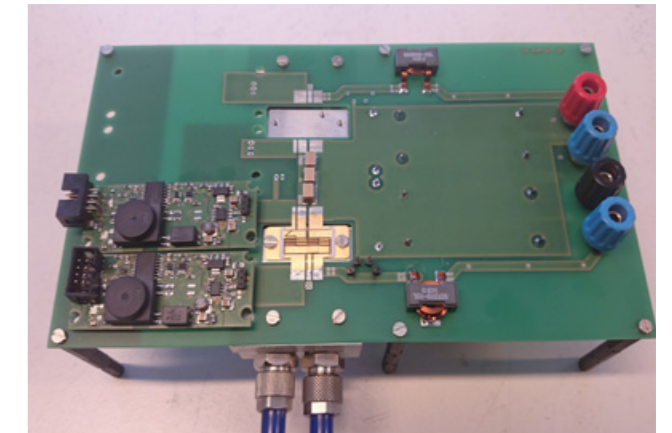


Fig. 4. Half-bridge chip-on-board arrangement consisting of normally-off GaN-transistors (65 mΩ) and GaN Schottky diodes (center) embedded in a test board including the gate drivers (left).

Im „Joint Lab Power Electronics“ bündeln das Ferdinand-Braun-Institut und die Technische Universität Berlin (TUB) seit Ende 2013 ihr Know-how auf dem Gebiet der Technologie von GaN-Leistungstransistoren (FBH) und von leistungselektronischen Schaltungs- und Messkonzepten (TUB). Durch eine aufeinander angepasste und optimierte Chip-Technologie und Schaltungstechnik soll das enorme Potenzial der GaN-Leistungselektronik in Richtung von hocheffizienten, miniaturisierten und leichten Energiekonvertern ausgeschöpft werden. Die Arbeiten im Joint Lab konzentrierten sich zunächst auf den Aufbau einer gepulsten Leistungsmesstechnik. Aufbauend auf diesen neuen Charakterisierungsmöglichkeiten wurde ein Modell der Leistungstransistoren geschaffen, das auch dynamische Effekte mit einbezieht. Dies ist die Grundlage für künftige leistungselektronische Systeme wie etwa Halb- oder Vollbrückenkonverter.

For further information:



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

# Diode Lasers *Diodenlaser*

**Business Areas & Research**  
Geschäftsbereiche & Forschung

Das Ferdinand-Braun-Institut ist eine der weltweit führenden Einrichtungen bei der Erforschung und Entwicklung miniaturisierter, hochentwickelter Laserstrahlquellen. Die Lichtquellen basieren auf hochbrillanten Diodenlasern, die vom roten bis zum nah-infraroten Spektralbereich (630 nm...1180 nm) emittieren. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig und steigen mit dem zunehmenden Einfluss der optischen Technologien in Industrie und Forschung. Entsprechend nehmen auch die Forschungsaufgaben für das Institut zu. Unter anderem hat das FBH im vergangenen Jahr gepulste Strahlquellen für verschiedene Anwendungsbereiche entwickelt. E-Beam-Strukturen im Nanometerbereich wurden technologisch so weit vorangebracht, dass sie erfolgreich in hochbrillante DBR-Diodenlaser-Arrays implementiert werden konnten. Die langfristig angelegten Arbeiten zur Steigerung von Effizienz und Brillanz von Diodenlasern laufen planmäßig weiter, wobei der nächste Integrations-schritt, die Entwicklung von anwendungsorientierten Laserstrahlquellen, weiter an Bedeutung gewinnt.

Mit seinen Kompetenzen deckt das Institut den gesamten Teil der Wertschöpfungskette ab: von Simulation und Entwurf über die technologische Realisierung der Halbleiterchips bis zum Aufbau einsatzfähiger Diodenlasermodule. Dabei werden sämtliche Entwicklungen speziell auf die Erfordernisse der jeweiligen Anwendung zugeschnitten. Für Hochleistungs-Systeme etwa entwickelt das FBH maßgeschneiderte Breitstreifenlaser, Diodenlaser-Barren und -Stacks, die zum Pumpen von Festkörperlasern sowie für den direkten Einsatz in der Materialbearbeitung und der Medizin genutzt werden. Laserdioden werden zudem gemeinsam mit Linsen, Kristallen und weiteren optischen Elementen zu sehr kompakten, hybrid-integrierten Diodenlasermodulen aufgebaut. Diese können vielfältig eingesetzt werden, von der Medizintechnik, über Displays, bis hin zu Präzisionsmesstechnik und Sensorik. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von hochfrequent modulierten Diodenlasern und Lichtquellen, die bei Sub-Nanosekundenpulsen höchste Spitzenleistungen liefern. Diese Strahlquellen bündeln zwei Kernkompetenzen des Instituts: die Hochfrequenz-Elektronik und die Optoelektronik.

Herausragende Ergebnisse des Jahres 2014 waren:

- Pump laser module für Ultrahochleistungs-Festkörperlasersysteme mit 5 J Pumpenergie (5 kW Spitzenleistung) und hohen Wiederholraten von 200 Hz,
- die Entwicklung sehr kurzer (2 mm) Halbleiter-Wellenleiter-Modulatoren für die Freistrahldatenübertragung mit Raten bis 5 Gbit/s,
- die Entwicklung hochbrillanter, rot emittierender Diodenlasermodule mit 500 mW Ausgangsleistung für holografische Displays.

## Diode Lasers

### Diodenlaser

The Ferdinand-Braun-Institut is one of the world-leading research centers for miniaturized, smart light sources based on high-brilliance diode lasers, covering the wavelength range from 625 nm to 1180 nm. The ever-increasing impact of optical technologies in industry and research leads to a rising amount of applications, subsequently also boosting R&D work at the institute. Recent activities include pulsed light sources addressing various industrial applications. Moreover, simulation tools have been developed as basis for the design of miniaturized external cavity diode lasers suitable for sophisticated applications in material analysis and high-precision laser metrology. Regarding current technology improvements, E-beam-based nanometer structures have been successfully applied in high-brilliance DBR diode lasers arrays. As a matter of course, the FBH also followed up on its long-term development objective to constantly increase efficiency and brilliance of diode lasers, likewise taking into account the upward trend on application-oriented laser sources.

Capabilities of the FBH cover the full value chain, from simulation, design, and technological realization of semiconductor chips to the assembly of ready-to-use diode laser modules. All FBH developments are designed precisely to fulfill the requirements of specific applications. For high-performance laser systems, for example, we develop tailor-made broad area lasers, diode laser bars and stacks used for the pumping of solid-state lasers and for direct applications in material processing and medical technology. Laser diodes are also assembled together with lenses, crystals, and further optical elements to very compact, hybrid-integrated diode laser modules for use in a wide range of applications, from medical technology, to displays, to high-precision metrology and sensor technology. A further focus is on high frequency modulation of laser radiation and on high peak power sub-ns pulses, both combining FBH's RF and laser competence.

Outstanding results in 2014:

- pump laser modules for ultra-high power solid-state laser systems with 5 J pump energy (5 kW peak power) and high repetition rates of 200 Hz,
- development of very short (2 mm) semiconductor waveguide modulators for up to 5 Gbit/s data communication,
- development of highly brilliant 500 mW red-emitting diode laser module for holographic displays.

## High-power pump modules for high-energy short-pulse solid-state lasers

Diode lasers are widely used as pump sources for high-energy short-pulse solid-state laser systems. Such high-energy systems are required with increased output power and repetition rate to enable a wide range of commercial applications such as tunable x-ray generation and laser shock processing, as well as for fundamental studies into material science and physics. Diode laser pump sources with improved characteristics are also needed to make this performance scaling possible. During 2014, FBH scientists both demonstrated substantial performance improvements in the diode lasers and constructed and delivered four high-energy pump modules. These pump modules are required for integration into a disc laser system at the FBH's development partner in Adlershof, the Max Born Institut (MBI).

The diode lasers are operated in quasi-continuous wave (QCW) mode, with lasing wavelength  $\lambda = 935$  nm and pulse width  $\tau = 1$  ms tailored to match the requirements of the MBI disc laser, which is constructed from Ytterbium-doped material. The disc-laser geometry allows the solid-state crystal to be efficiently cooled, enabling the use of higher repetition rates, in the range  $f = 100 \dots 200$  Hz, corresponding to a pump duty cycle of 10...20%. Conventional commercial QCW pump sources are constructed using low-cost vertical stacked arrays of diode laser bars. This technology is not suitable for use with such long duty cycles, as the cooling is too inefficient. Therefore, the FBH has developed an alternative approach that makes use of large aperture (1200  $\mu\text{m}$ ) single emitters instead of bars. Each single emitter delivers reliable QCW (1 ms, 100...200 Hz) operating power of 130 W with a conversion efficiency of 60% at the operating point, enabled by the use of advanced epitaxial layer designs, long resonators, and custom lateral device designs as well as robust facet passivation. This represents substantial improvement in the state-of-the-art, corresponding to a power density (> 1000 W per cm aperture) more than double that of commercial QCW laser bars (~ 300...400 W per cm aperture).

These high-power single emitters are soldered between two expansion-matched copper tungsten carriers, subsequently assembled into a vertically stacked array of 28 single emitters. The entire array is then bonded in a sandwich between two heat sinks, which cool the array from both sides: sufficient cooling to allow operation at repetition rates up to 200 Hz and resulting duty cycles of up to 20%. The emission from two such arrays is then optically combined and delivered into an optical fiber with 1.9 mm core diameter. The vertical stack design is tailored to enable the use of a simple, alignment-tolerant, optical design, with low losses. The two stacks, their cooling system, all optics, and the coupling fiber are subsequently assembled into an integrated pump module, with an example shown in Fig. 1, as delivered to the MBI.

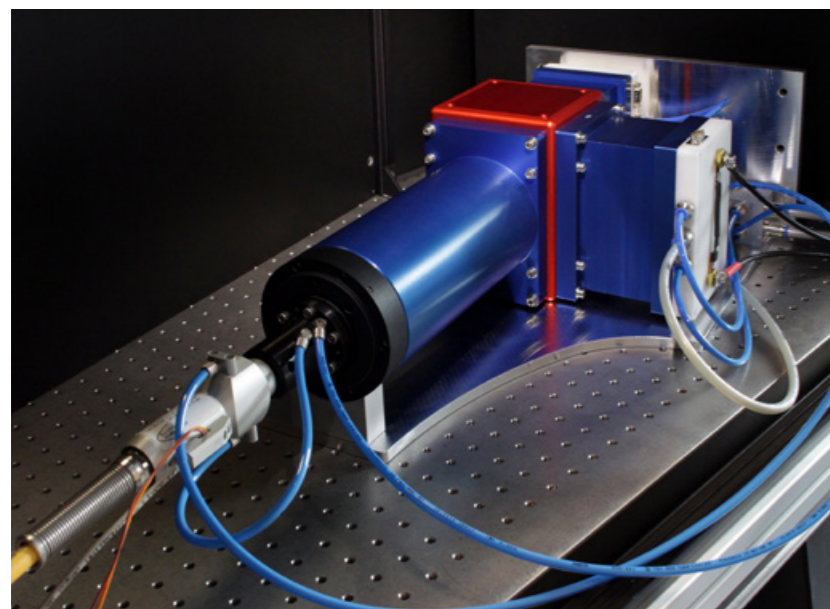


Fig. 1. FBH diode laser source suitable for high-energy density pump applications.

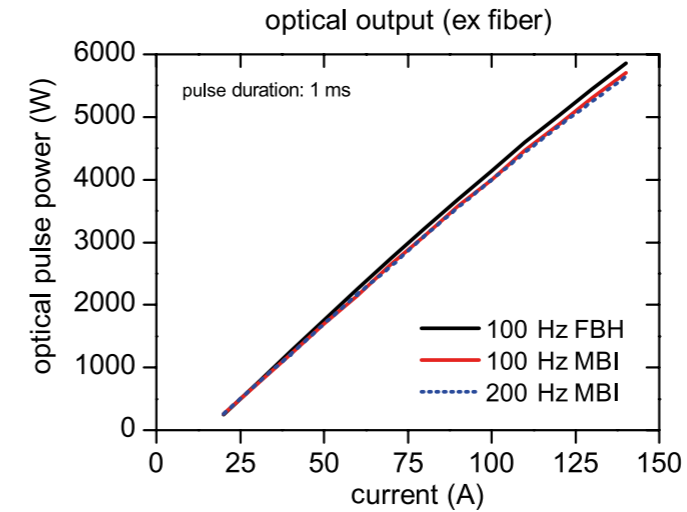


Fig. 2. Optical output power emitted from pump module fiber (1.9 mm core diameter) as a function of bias current, under quasi-continuous-wave conditions (1 ms pulse width, 100 - 200 Hz repetition rate, 10 - 20 % duty cycle, FBH and MBI data).

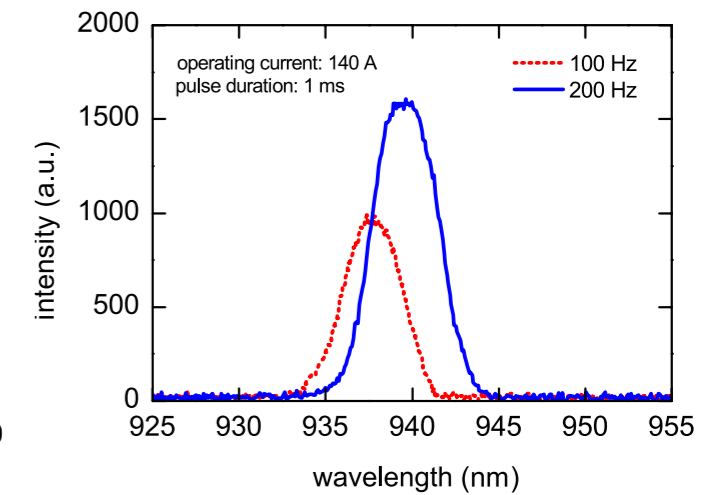


Fig. 3. Spatially integrated optical output power emitted from fiber as a function of wavelength, for bias current of 140 A at 100 Hz and 200 Hz (MBI data).

Measurements of the optical output power emitted from the fiber are shown in Fig. 2, at the planned operating conditions of  $\tau = 1$  ms and  $f = 100 \dots 200$  Hz. A fiber-coupled power of > 5500 W was measured at the FBH and confirmed in repeat measurement at the MBI during commissioning. Varying the duty cycle between 10 % and 20 % leads to only minimal changes in the optical output. The spectral characteristics of the emitted power are shown in Fig. 3. The spectral width with 95% power content at peak output power and 200 Hz repetition rate is 6.6 nm, with centroid wavelength of 939.6 nm, confirming that the module is correctly wavelength-targeted and operates with sufficiently narrow spectrum for effective pumping of Ytterbium-doped disc lasers. Such pump sources are therefore well suited for use in advanced solid-state laser systems.

This work was supported with EFRE funds provided by the Senate of Berlin under Grant Number 20072013 2/42.

Am FBH wurden Diodenlaser-Pumpmodule als Teil eines Lasersystems entwickelt, mit dem sich kurze Pulse mit hoher Pulsenergie und hohen Repetitionsraten erzeugen lassen. Jedes dieser Module liefert Pulse mit einer Länge von 1 ms bei Wiederholraten von bis zu 200 Hz bei einem Tastverhältnis von bis zu 20%. Am Faserausgang steht eine Pulsleistung von mehr als 5500 W zur Verfügung. Da solch hohe Tastverhältnisse mit konventionellen Stacks aus Laserbarren nicht erreicht werden können, haben wir stattdessen 1200  $\mu\text{m}$  breite Einzelemitter-Chips entwickelt. Jeder dieser Einzelemitter liefert eine Pulsleistung von 130 W. Die entsprechende Leistungsdichte von mehr als 1000 W pro cm Emitterbreite beträgt damit etwa das Doppelte kommerzieller QCW-Laserbarren. Jedes Modul besteht aus zwei Stacks mit je 28 Ebenen, deren kollimierte Strahlungsfelder durch einfache Umlenkspiegel kombiniert und gemeinsam in eine Faser eingekoppelt werden. Solche Pumpmodule sind Schlüsselkomponenten für zukünftige Festkörperlaser-Systeme.

### Publications

W. Pittroff, B. Eppich, G. Erbert, R. Platz, D. Tyralla, G. Tränkle, "Simple design for fiber coupled 9xx nm kW-QCW pump module with high duty cycle based on customized chips and lateral heat removal", Proc. SPIE 8965, 896515 (2014).

R. Jung, J. Tümmeler, Th. Nubbemeyer, I. Will, W. Sandner, G. Erbert, W. Pittroff, "Disk lasers for powerful picosecond pulses with 100 Hz repetition rate", Disklaser Workshop, Dausinger & Giesen, Stuttgart, May 15 (2012).

## Ultra-compact semiconductor-based phase modulators for optical data communication in the Gb/s range

Recently, there have been growing efforts towards compact and robust modules for coherent optical communication as well as atomic spectroscopy in space. III-V semiconductor technology is very attractive to realize the key devices for these modules, i.e., lasers and phase modulators, because they can be combined on a microbench by hybrid integration. Whereas distributed feedback or distributed Bragg reflector diode lasers with spectral linewidths below 1 MHz are now state-of-the-art, compact semiconductor-based modulators for data communication in the Gb/s range in the intended wavelength range around and below 1  $\mu\text{m}$  have not been available so far.

The phase of an optical beam propagating in a doped semiconductor can be modified due to the dependence of the refractive index on the internal electric field and the charged carriers, which can be easily changed by an external bias. To obtain an optimum overlap between the light intensity and the region of varying refractive index, the heterostructure guiding the optical wave and the doping profile of the pin junction facilitating the phase modulation must be aligned properly. Fig. 1a shows the profile of the refractive index of a typical GaAs/AlGaAs-based layer structure and the resulting vertical profile of the guided optical mode. The thin layers with low refractive index and the small index step between cladding layers and waveguide core result in a strong confinement of the fundamental mode and a good suppression of higher order modes.

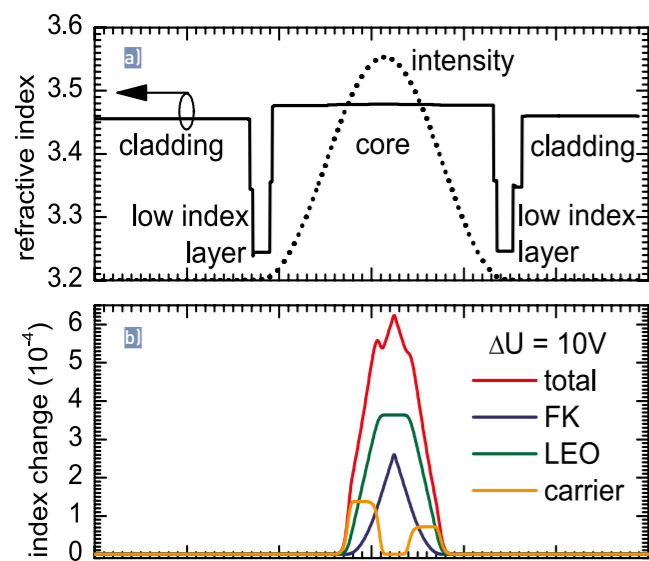


Fig. 1. Simulated vertical profiles of (a) refractive index (solid), mode intensity (dotted), and (b) bias-induced change of the refractive index.

For testing purposes, the modulator chip mounted on a carrier was connected to an electronic driver circuit, which was specifically developed to meet the requirements regarding speed and hybrid integration. The driver contains a monolithic microwave integrated circuit (MMIC) based on GaN transistor technology which enables electrically short interconnects to the modulator chip. This is necessary to minimize parasitic inductances which would otherwise compromise the data rate. The MMIC includes a three-stage amplifier with the final stage realized in push-pull configuration.

The beam of an in-house developed distributed Bragg reflector laser emitting at 975 nm was collimated, coupled into a two-stage optical isolator (60 dB isolation) to minimize optical feedback effects, and split into two parts. One beam was focused into the

Fig. 1b shows the calculated contributions due to the linear electro-optic (LEO), the Franz-Keldysh (FK), and charged-carrier effects to the change of the refractive index when varying the reverse bias between 5 V and 15 V. The total index change overlaps with the mode profile very well. The bias needed to change the phase by  $\pi$  can be calculated according to  $U_{\pi} = \pi \Delta U / L \Delta \beta$  where  $\Delta \beta$  is the difference of the propagation constants of the optical mode for a change of the bias by  $\Delta U$ . For a length of the modulator as small as  $L = 2$  mm a value of  $U_{\pi} = 8.3$  V is obtained, which can be realized easily with a corresponding electronic driver circuit (see below).

Fig. 2 shows a cross-section of the developed modulator chip. The layer structure was grown on a (001) n-GaAs substrate using metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE). The 3  $\mu\text{m}$  wide and 2.4  $\mu\text{m}$  deep ridge defined by i-line stepper lithography and dry etching confines the optical mode laterally. The ridge waveguide was oriented nearly parallel to the  $[1\bar{1}0]$  crystallographic direction for the purpose of taking advantage of the LEO effect. To keep the capacitance of the

waveguide core within the ridge of the modulator chip. After propagation through the phase modulator, the output beam was superimposed with the second beam. The combined beam was then coupled into an optical fiber connected to a fast photodiode. The time trace of the electrical signal of the photodiode was recorded by a fast oscilloscope.

The driver circuit was triggered with a fast pulse pattern generator to realize a non-return-to-zero (NRZ) modulation of 2.5 Gb/s with a pseudorandom 31-bit sequence. Figs. 3a and 3b show the recorded eye diagrams of the electrical input signal to the driver and the resulting optical output signal, respectively. The open "eye" indicates successful modulation of the phase by  $\pi$  and minimal signal distortion. The necessary modulation amplitude of  $U_{\pi} \approx 7$  V is slightly smaller than the theoretical prediction.

Thus, the FBH has successfully developed an only 2 mm long semiconductor-based phase modulator chip and a tailored electronic driver circuit. Their hybrid integration with a diode laser will result in a compact module for coherent data communication in the Gb/s range which has not been available so far.

This work is supported by the German Space Agency DLR with funds provided by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) under Grant Number 50WM1141.

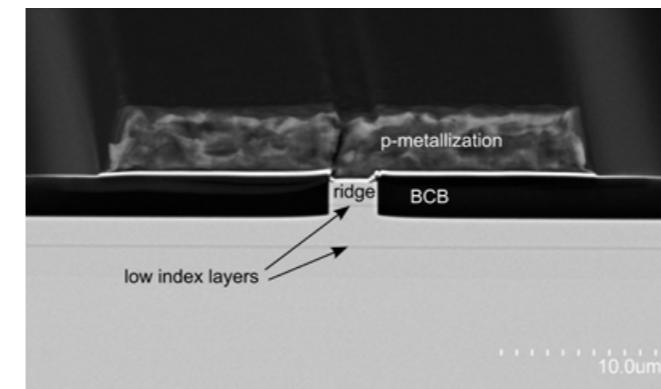


Fig. 2. Scanning electron microscope image (cross-section) of the developed modulator chip showing the semiconductor structure with the ridge, BCB insulation, and p-metallization.

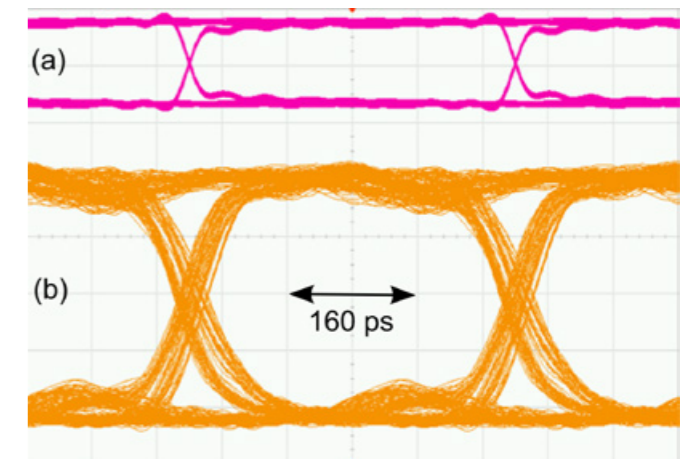


Fig. 3. Measured eye diagrams of (a) the electrical driver input and (b) the optical output signals of the developed phase modulator for a NRZ bit-pattern with 2.5 Gb/s.

Für die kohärente Datenkommunikation und die Atomspektroskopie im Weltraum werden kompakte und robuste opto-elektronische Module benötigt. Wesentliche Bestandteile dieser Module sind Laser mit einer kleinen spektralen Linienbreite und Phasenmodulatoren. Während DFB- oder DBR-Diodenlaser mit spektralen Linienbreiten von weniger als 1 MHz mittlerweile dem Stand der Technik entsprechen, standen kompakte halbleiterbasierte Modulatoren bisher nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund entwickelte das FBH einen aus einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur bestehenden Phasenmodulator und eine auf GaN-Transistoren beruhende maßgeschneiderte Treiberschaltung. Mit nur 2 mm langen Modulatoren konnte die Möglichkeit einer kohärenten Datenkommunikation mit 2,5 Gb/s demonstriert werden.

### Publication

B. Arar, H. Wenzel, R. Güther, O. Brox, A. Maaßdorf, A. Wicht, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, H.N.J. Fernando, A. Peters, "Double-heterostructure ridge-waveguide GaAs/AlGaAs phase modulator for 780 nm lasers", Appl. Phys. B, vol. 116, no. 1, pp. 175-181 (2014).

## Red-emitting highly coherent diode lasers for holographic displays

For more than 30 years, holograms have only been used in niche applications. The reason for this is that real-time recording of large holograms requires laser sources which are not only highly coherent, but also provide output powers of several hundreds of milliwatts. In the visible range of the spectrum, such light sources could only be provided by gas lasers as, for example, by red-emitting 647 nm Krypton lasers. However, applications using such lasers hardly left the laboratory environment due to their extensive lengths of up to 2 m. Additional constraints are the high required voltages, low efficiency, and fragile glass-tube constructions.

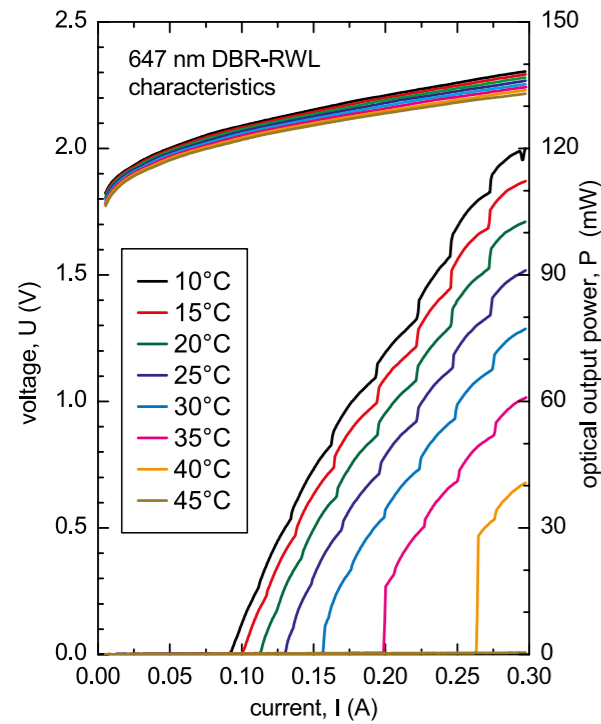


Fig. 1. Voltage-current and power-current characteristics of a DBR-RW laser at 647 nm.

In order to move the technology from the lab to the consumer: size, cost, and energy consumption of the laser sources have to be shrunk dramatically. The FBH recently developed red-emitting semiconductor ridge-waveguide (RW) lasers with integrated distributed Bragg-reflectors (DBR) featuring only 2 mm length. The DBR gratings were implemented through the surface after a solitary epitaxial growth. Thus, a second epitaxial growth step, used previously by other groups, can be avoided. The grating was covered with an insulator and metal, which allowed p-side down mounting for improved cooling capabilities. Such DBR-RW lasers feature a diffraction-limited beam and a linewidth of less than 2 MHz along with an optical output power of up to 100 mW (see Fig. 1). This linewidth, which corresponds to a coherence length of more than 20 m, is sufficient to enable the play back of 3D holograms in a partially coherent holographic display. However, recording real-time full coherent holograms requires more than 500 mW output power. While DBR-RW lasers provide the necessary coherence, they cannot achieve the required output power. Their maximum power is limited by thermal over roll and the high power density at the diode laser facet. Here, we made use of the feature of semiconductor diodes according to which they can also be used as amplifiers. Careful design of the amplifier chip allows boosting the output power of DBR-RW lasers without significantly degrading coherence properties and beam quality. The purpose-built truncated tapered amplifiers feature a length of 2 mm, an input facet width of 30  $\mu\text{m}$ , and an output facet of 100  $\mu\text{m}$ . The amplifier was seeded with 40 mW from a DBR-RW laser in a master-oscillator power-amplifier (MOPA) experimental assembly. The MOPA

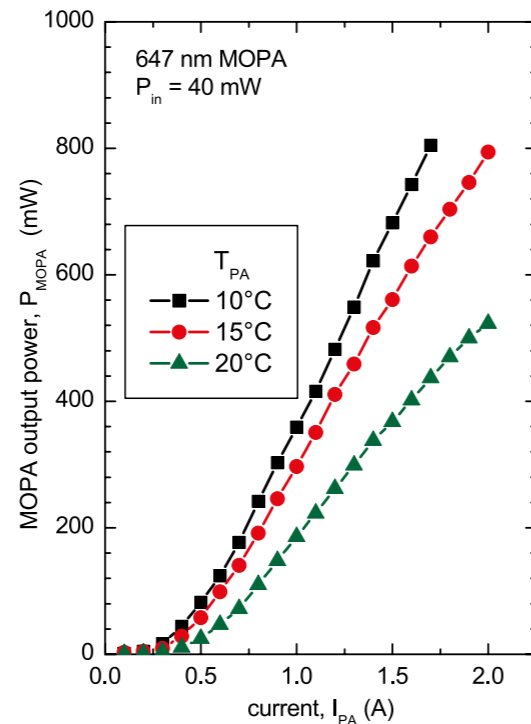


Fig. 2. Power-current characteristics of a MOPA consisting of a DBR-RW laser and a truncated tapered power amplifier.

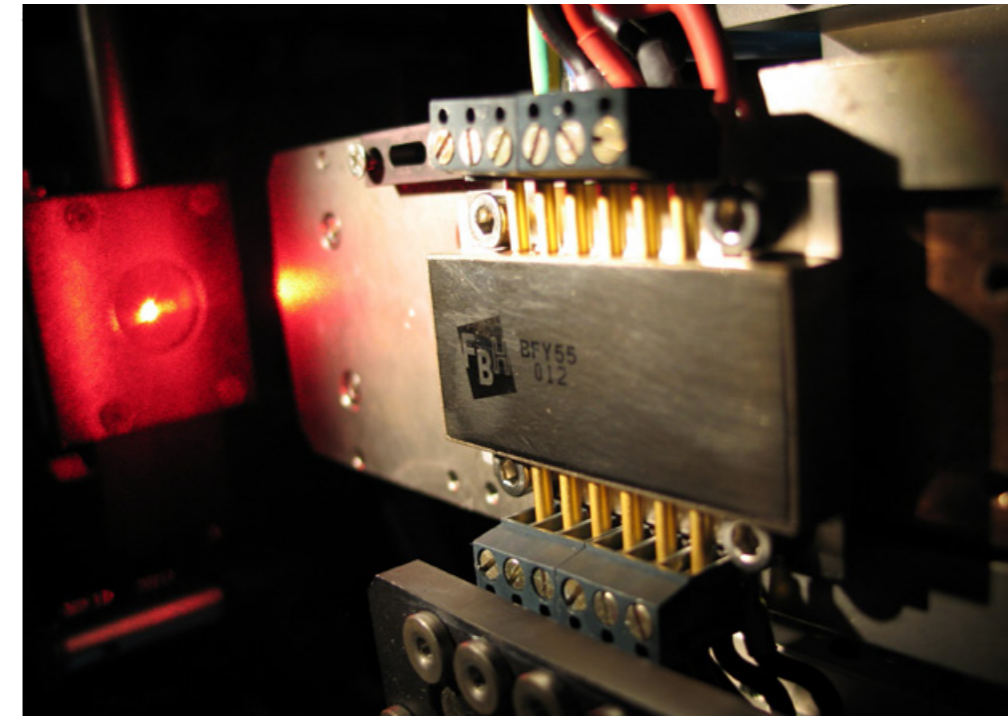


Fig. 3. Red-emitting MOPA module in high-power butterfly package.

design required adapted optics to collimate the oscillator light and guide it successfully through the amplifier while maintaining beam quality and coherence on a high level. This MOPA achieved a single-mode emission near 647 nm with optical output power of more than 800 mW (see Fig. 2). The linewidth of the MOPA was about 8 MHz and hence corresponds to a coherence length of several meters, which makes it well-suited for holography.

We have also started first steps of miniaturization of the experimental MOPA. The main challenges here are proper cooling and the required thermal dissipation of the miniaturized MOPA module. Additionally, the facet load needs to be reduced to enable reliable operation. First experiments of a miniaturized hybrid MOPA with a truncated tapered amplifier reached an optical output power of more than 500 mW. To dissipate the heat and allow proper cooling, a new type of high-power butterfly package with a total length of 55 mm was designed and manufactured (see Fig. 3). It is believed that these miniaturized MOPAs in a suitable butterfly package will enable recording of real time 3D holographic scenes in the near future. As a result, true 3D television for retail may become an interesting and accessible option for hologram technique.

We acknowledge funding by the Korean government for the global joint project "Development of narrow-band Red/Blue/Green compact laser modules for the next-generation 3D-LCD TV" (HolographicTV).

### Publications

D. Feise, J. Pohl, G. Blume, K. Paschke, "DBR grating stabilized ridge waveguide lasers emitting at 647 nm for real 3D holographic displays", Proc. SPIE, vol. 9382, Photonics West, San Francisco, USA, Feb. 8-12, 9382-21, (2015).

K. Paschke, G. Blume, D. Feise, J. Pohl, B. Sumpf, "Watt-level red-emitting diode lasers and modules for display applications", The 4th Laser Display and Lighting Conference (LDC'15), Yokohama, Japan, Apr. 22-24, (2015).

D. Feise, G. Blume, J. Pohl, K. Paschke, "Distributed Bragg reflector ridge waveguide lasers emitting longitudinal single mode at 647 nm", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 21, no. 6, 1501706 (2015).

G. Blume, J. Pohl, D. Feise, M. Jendrzejewski, M. Greiner, P. Ressel, K. Paschke, "Single-mode Master-Oscillator Power-Amplifier at 647 nm with more than 500 mW output power", Opt. Lett., vol. 40, no. 8, pp. 1757-1759 (2015).

K. Paschke, J. Pohl, D. Feise, G. Blume, G. Erbert, "Properties of 62x nm red-emitting single mode diode lasers", Proc. SPIE, vol. 9002, Photonics West, San Francisco, USA, Feb. 1-6, 90020A (2014).

D. Feise, W. John, F. Bugge, G. Blume, T. Hassoun, J. Fricke, K. Paschke, G. Erbert, "96 mW longitudinal single mode red-emitting DBR ridge waveguide laser with tenth order surface gratings", Opt. Lett., vol. 37, no. 9, pp. 1532-1534 (2012).

Das FBH hat eine Laserstrahlquelle im roten Spektralbereich mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Kohärenz für die Anwendung in holografischen Displays entwickelt. Die Strahlquelle basiert auf einem Halbleiterlaser mit einem neuartigen integrierten Oberflächengitter, der eine einzelne longitudinale Mode mit einer Leistung von bis zu 100 mW und einer Linienbreite von ca. 1 MHz emittiert (siehe Abb. 1). Die Strahlung wurde in einem Laborexperiment durch einen eigens entwickelten Halbleiterverstärker auf bis zu 800 mW gesteigert – unter Beibehaltung der spektralen und räumlichen Eigenschaften des Strahls (siehe Abb. 2). Derzeit laufen erste Arbeiten zur Miniaturisierung des experimentellen Aufbaus in ein Butterfly-Package von der Größe einer Streichholzschatel. Die kompakte Strahlquelle hat ihre Leistungsfähigkeit mit einer Ausgangsleistung von mehr als 500 mW bei 647 nm (siehe Abb. 3) demonstriert. Zukünftig soll damit eine einfache, für den Massenmarkt taugliche Strahlquelle zur Verfügung stehen, mit der lebensechte 3D-Hologramme schon bald Realität werden können.

# Diode laser-based light source for deep ultraviolet Raman excitation

One challenge in Raman spectroscopy is to avoid or minimize fluorescence background signals which, in some cases, obscure the relatively weak Raman signals. The major advantage of Raman spectroscopy with excitation wavelengths in the deep UV below 260 nm compared to visible or NIR-excited Raman spectroscopy is that the Raman signal can be spectrally separated from the fluorescence background. Moreover, due to the  $\omega^4$  dependence of the Raman scattering cross section, the Raman signal also increases significantly at shorter excitation wavelengths. Additionally, depending on the analyzed substance, deep UV (DUV) excitation leads to resonant effects that can enhance the Raman signal by orders of magnitude.

Up to now, DUV laser sources suffer from high power consumption and a large footprint. To utilize the benefits of DUV Raman spectroscopy in application fields outside the lab environment the demand for compact and reliable DUV laser light sources based on diode lasers is steadily increasing.

To access this wavelength range, the Ferdinand-Braun-Institut pursues a novel approach using commercially available laser diodes emitting in the blue spectral range with more than one Watt optical output power. In the setup, the wavelength is stabilized in an external cavity (ECDL) arrangement, and efficient frequency doubling is performed through a nonlinear crystal. By using such diode lasers, an ECDL system with an optical output power of 400 mW and narrowband emission at 445 nm has been realized for the first time. The system is based on a commercially available GaN laser diode (OSRAM Opto Semiconductors) that emits with a spectral width of 1 nm without external feedback. Due to an optimized Littrow configuration it was possible to reduce the spectral width to 20 pm. Longitudinal mode selection in the ECDL system is realized by a holographic surface diffraction grating with 3600 lines/mm. Fig. 1 shows the emission spectra of the Fabry-Perot diode and the ECDL system at an output power  $P = 400$  mW and a temperature  $T = 20^\circ\text{C}$ . The side-mode suppression ratio of the ECDL system is 44 dB. At 400 mW output power, the beam quality shows  $M^2$  values around 5. Due to the high optical output power, narrow spectral width, and sufficient beam quality, the ECDL system is suitable as pump source for nonlinear frequency conversion into the DUV wavelength region.

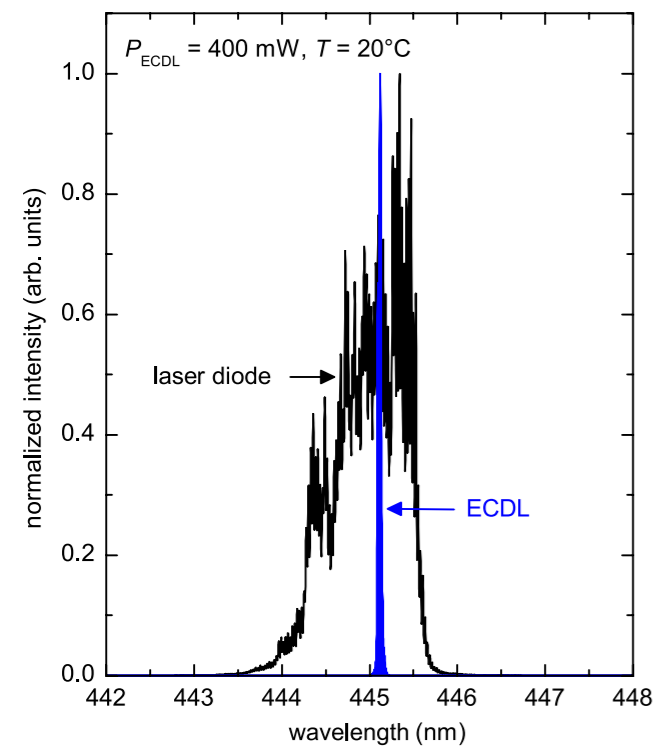


Fig. 1. Emission spectrum of the ECDL system (blue) at  $P_{\text{ECDL}} = 400$  mW and  $T = 20^\circ\text{C}$ . Spectrum of the FP diode laser (black) for comparison.

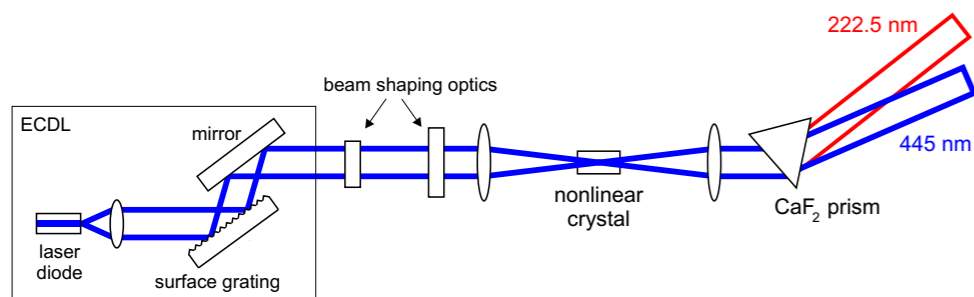


Fig. 2. Experimental setup for simple single-pass second harmonic generation based on a high-power GaN ECDL system.

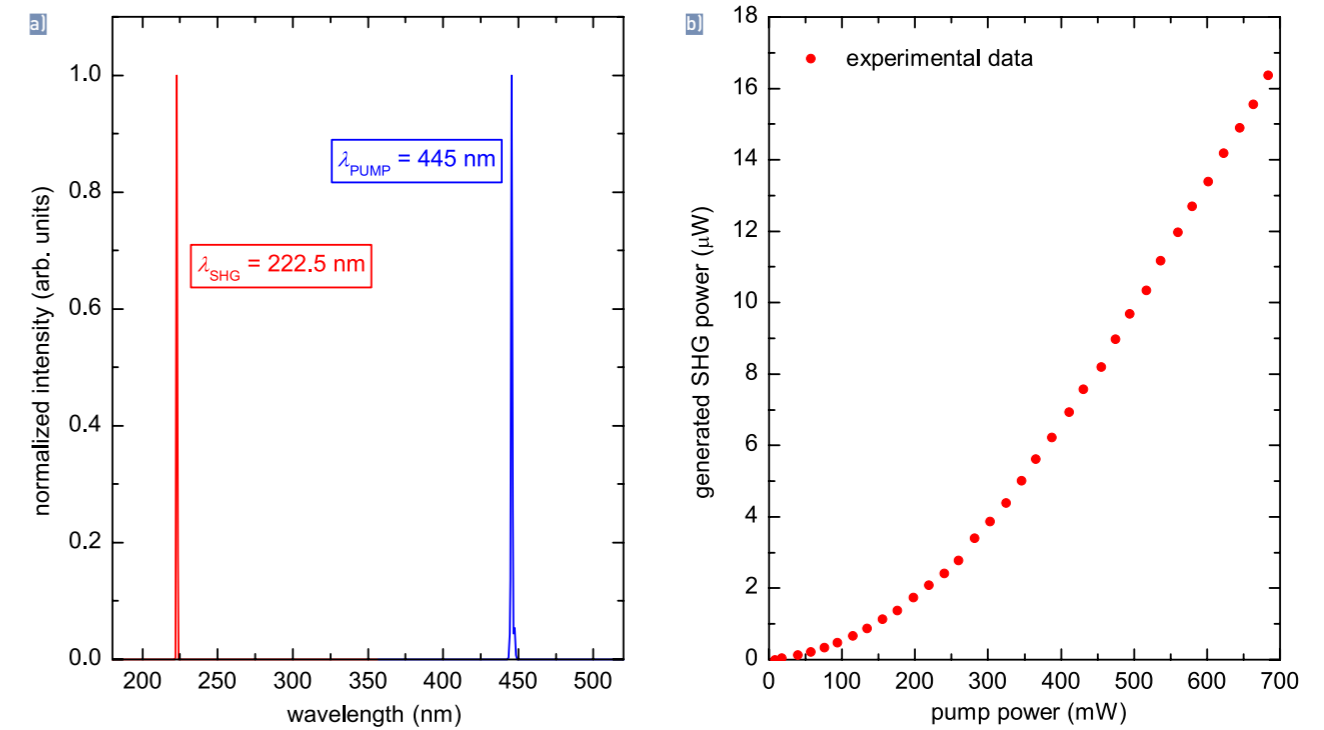


Fig. 3. Spectrum of the generated second harmonic at  $\lambda = 222.5$  nm and the ECDL emission at  $\lambda = 445$  nm, (b) generated SHG power versus fundamental pump power.

Using this light source, UV radiation with an emission wavelength around 222.5 nm has been generated by single-pass second harmonic generation (SHG) in a BBO crystal, as can be seen in the experimental setup in Fig. 2. The beam from the ECDL system is focused into a BBO crystal where the UV light is generated. The second harmonic and the fundamental beams are spatially separated by a dispersive  $\text{CaF}_2$  prism.

Fig. 3a shows a spectrum of the generated second harmonic light at 222.5 nm and the fundamental light at 445 nm at a pump power of 400 mW from the ECDL. Fig. 3b depicts the generated UV power at 222.5 nm versus the pump power from the ECDL. A pump power of 680 mW generates UV power of 16  $\mu\text{W}$ .

Thus, due to the achieved output power in the lower  $\mu\text{W}$  range this concept enables compact and efficient light sources based on diode lasers emitting in the deep UV spectral region that are in principle suitable for Raman spectroscopy.

These activities were performed together with TU Berlin and funded within the HautScan project by Einstein Stiftung under Grant Number A-2011-88.

**Laserlicht im tiefen UV-Bereich ist für die Raman-Spektroskopie von großem Interesse. Um diesen Spektralbereich zu erreichen verfolgt das FBH seit Kurzem einen neuen Ansatz: Die Wellenlänge kommerziell verfügbarer Laserdioden im blauen Spektralbereich mit > 1 Watt optischer Ausgangsleistung wird dabei mittels effizienter Frequenzverdopplung halbiert. Am FBH wurde nun erstmals ein Hochleistungs-ECDL-System (External Cavity Diode Laser) mit einer optischen Ausgangsleistung von 400 mW und schmalbandiger Emission bei 445 nm realisiert. Die genutzte Laserdiode emittiert ohne externe Rückkopplung mit einer spektralen Breite von 1 nm (FWHM). Diese spektrale Breite konnte auf 20 pm reduziert werden, indem die Diode in eine optimierte externe Kavität in Littrow-Konfiguration eingesetzt wurde. Durch eine einfache Single-Pass-Frequenzverdopplung in einem BBO-Kristall wurde mit diesem ECDL-System UV-Strahlung mit einer Emissionswellenlänge um 222,5 nm generiert. Bereits mit diesen ersten Werten im unteren  $\mu$ -Wattbereich sind Anwendungen in der Raman-Spektroskopie möglich.**

## Publications

N. Ruhnke, A. Müller, B. Eppich, R. Güther, M. Maiwald, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, "Single-pass UV generation at 222.5 nm based on high-power GaN external cavity diode laser", Opt. Lett., vol. 40, no. 9, pp. 2127-2129 (2015).

N. Ruhnke, A. Müller, B. Eppich, M. Maiwald, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, "400 mW external cavity diode laser with narrowband emission at 445 nm", Opt. Lett. 39, 3794-3797 (2014).

# Ultra-narrow linewidth semiconductor laser sources for precision measurements

In recent years, ultra-narrow linewidth lasers attracted growing interest of the opto-electronic industry and both the applied and the fundamental scientific community. Possible applications include coherent optical free-space communication protocols and high-precision metrology, such as optical frequency standards and light- and matter-wave interferometers. Modern semiconductor lasers cover nearly the entire optical spectrum and are available at low cost and in compact packages. However, their spectral properties need to be further improved to enable access to the majority of these applications.

A common approach to reduce the frequency noise of a semiconductor laser is to use optical feedback from an external optical element, e.g., a Bragg grating or a semi-transparent mirror. These so-called extended cavity diode lasers (ECDLs) feature optical linewidths (FWHM) of several kHz compared to tens of MHz of free-running single-mode diode lasers. Here, we present and characterize a distributed feedback (DFB) diode laser with resonant optical feedback from a monolithic confocal Fabry-Pérot (FP) resonator, see inset Fig. 1. The narrow bandwidth of the optical feedback from the FP resonator provides excellent suppression of the frequency noise power spectral density (PSD) by almost three orders of magnitude compared to the noise merit of ECDLs.

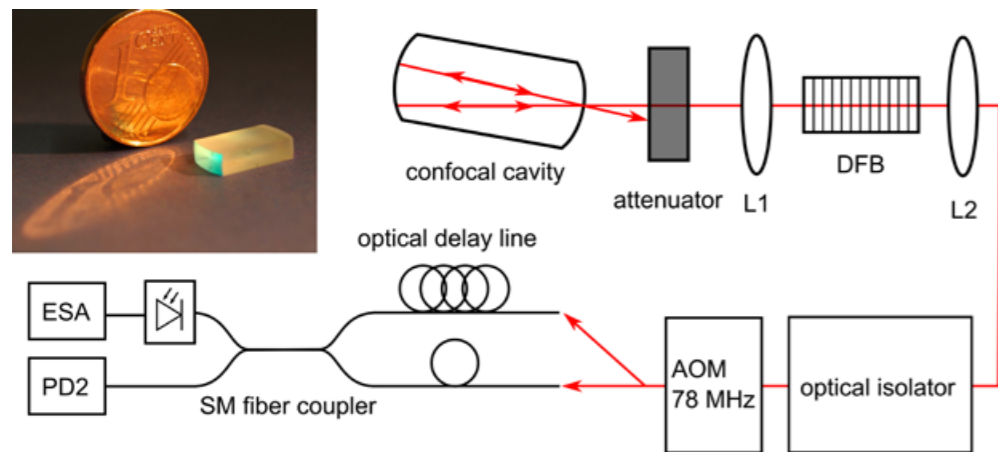


Fig. 1. Laser schematic and measurement setup. Inset: monolithic confocal Fabry-Pérot cavity.

We use a 1.5 mm long, single quantum well AlGaAs DFB diode laser designed and processed at the Ferdinand-Braun-Institut. The design wavelength is 780 nm, and both facets of the diode are anti-reflection coated. As can be seen in Fig. 1, the laser's rear output is focused with an aspheric lens and then coupled into an external FP cavity with a mirror curvature of 10 mm and power reflectivities of 0.97 and 0.9997. The cavity is tilted by 15° with respect to its optical axis such that only the resonant feedback is re-injected into the DFB laser, while the non-resonant light is reflected. If the frequency of the free-running DFB diode is close enough to a resonance frequency of the confocal cavity, the laser locks its frequency to the cavity resonance. The locking range of the laser strongly depends on the feedback level and phase, varying from 400 MHz up to several GHz. Within the locking range, the laser frequency is almost constant and nearly fully determined by the resonance frequency of the cavity.

In order to determine the frequency noise PSD and the laser linewidth, we employ a self-delayed homodyne beat-note measurement. The output beam of the DFB laser is collimated and guided through an acousto-optic modulator which shifts the laser frequency by 78 MHz. After passing an optical delay line, the frequency-shifted beam is superimposed with the unshifted zeroth order beam in a fiber X-coupler. Both beams interfere on a fast photo detector. We record the resulting beat-note signal with an RF-spectrum analyzer and determine the frequency noise PSD with the method described by Schiemangk et al.

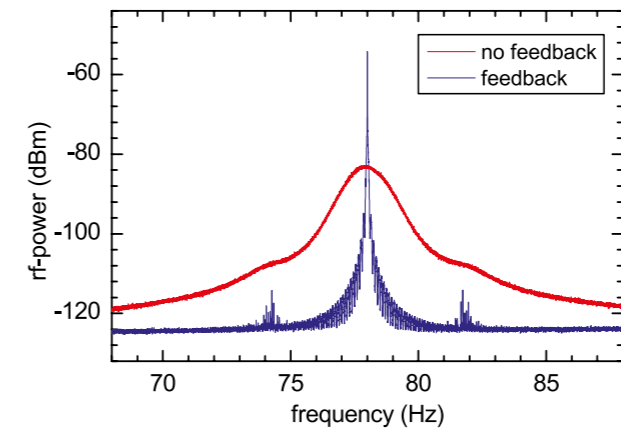


Fig. 2. RF-power spectra of the beat-note signal for the free-running DFB laser (red) and with resonant optical feedback (blue).

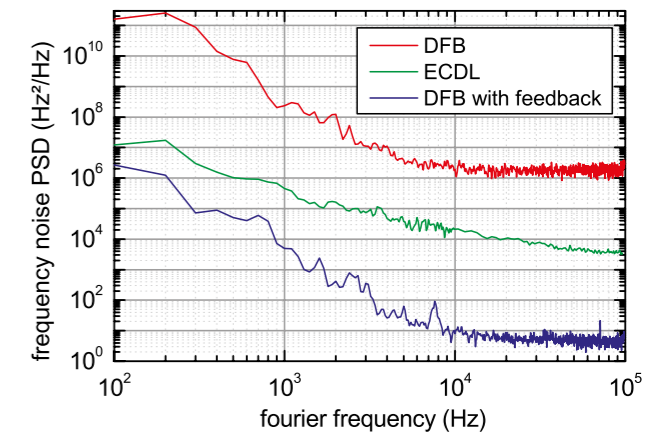


Fig. 3. Frequency noise power spectral density: free-running DFB laser (red), ECDL (green), and DFB laser with resonant optical feedback (blue).

Fig. 2 shows how the spectral linewidth of the laser is dramatically reduced under the influence of resonant optical feedback. Since the coherence length of the laser is much larger than the length of the delay line, we emphasize that it is not possible to measure the linewidth directly from the RF spectrum. The full information about the spectral noise is contained in frequency noise PSD. In Fig. 3 we show the frequency noise PSDs of the DFB diode laser with resonant optical feedback, the DFB laser without feedback, and a narrow linewidth ECDL. Resonant optical feedback from the cavity reduces the frequency noise PSD of the DFB laser by more than five orders of magnitude at high Fourier frequencies (> 10 kHz). The noise level at these frequencies is three orders of magnitude smaller than that of a typical ECDL. The white noise begins already at 20 kHz, which eases cancellation of noise at lower frequencies by means of active frequency stabilization, for instance, to an atomic or molecular reference. The white frequency noise level is  $S_{\sigma} = 5 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ , which corresponds to a Lorentzian (intrinsic) linewidth of  $\Delta\nu = S_{\sigma}\pi = 15.7 \text{ Hz}$ .

This work is supported by the German Space Agency DLR with funds provided by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under grant number 50WM1141.

**Spektral schmalbandige Halbleiterlaser werden für eine Vielzahl von wissenschaftlichen wie industriellen Anwendungen immer attraktiver, wie etwa für die kohärente Freiraumkommunikation und die Atominterferometrie. Um derartige Applikationen für Halbleiterlaser zu erschließen, müssen deren spektrale Eigenschaften jedoch noch weiter verbessert werden. Dazu nutzt das FBH externe monolithische Fabry-Pérot-Resonatoren, die durch resonante optische Rückkopplung die Linienbreite des Lasers dramatisch reduzieren. Sobald die Frequenz des freilaufenden Lasers einer Resonanz des externen Resonators entspricht, wird Licht aus dem Resonator zurück in den Laser injiziert. Dabei koppelt sich die Laserfrequenz an die Resonanzfrequenz des externen Resonators. Das Frequenzrauschen eines 1,5 mm langen DFB-Lasers wird dadurch um mehr als fünf Größenordnungen reduziert. Der weiße Rauschuntergrund liegt bei  $S_{\sigma} = 5 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ , was einer intrinsischen Lorentz-Linienbreite von  $\Delta\nu = S_{\sigma}\pi = 15,7 \text{ Hz}$  entspricht.**

## Publications

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. Express, vol. 23, no. 8, pp. 9705-9709 (2015).

M. Schiemangk, S. Spießberger, A. Wicht, G. Erbert, G. Tränkle, A. Peters, "Accurate frequency noise measurement of free-running lasers", Appl. Opt. 53(30), 7138-7143 (2014).



For further information:



<http://www.fbh-berlin.com/research/photonics>

# GaN Optoelectronics

## *GaN-Optoelektronik*

**Business Areas & Research**  
Geschäftsbereiche & Forschung

## GaN Optoelectronics

### GaN-Optoelektronik

*Innovative Lichtquellen auf Basis des Halbleitermaterials Galliumnitrid (GaN) und seiner Legierungen mit Aluminiumnitrid (AlN) und Indiumnitrid (InN) stehen in Mittelpunkt des Geschäftsbereiches GaN-Optoelektronik. Wie kein anderes Materialsystem ermöglicht (AlGaIn)N optoelektronische Bauelemente, deren Emissions- bzw. Detektionswellenlängen nicht nur den gesamten sichtbaren Bereich abdecken, sondern auch tief in den ultravioletten (UV) Spektralbereich hineinreichen. Die Arbeiten des Geschäftsbereichs zielen darauf, die Leistungsfähigkeit herkömmlicher Bauelemente, wie optische Emissionsleistung und Langzeitstabilität, stetig zu verbessern. Zudem werden vollkommen neuartige Bauelemente entwickelt, wie etwa Leuchtdioden (LEDs) mit einer Emissionswellenlänge unterhalb von 240 nm oder violett-emittierende Laserdioden mit gleichzeitig hoher Leistung und hoher Strahlqualität. Im Fokus stehen die Entwicklung von Laserdioden und Laserverstärkern mit Emissionswellenlängen im violetten, UV-A- und UV-B-Bereich, LEDs für den UV-B- und UV-C-Bereich und solarblinde UV-Fotodetektoren. Maßgeschneiderte Bauelemente werden zusammen mit Industriepartnern für verschiedenste Anwendungsfelder entworfen, wie die Atom- und Molekülspektroskopie, Gassensorik, Wasserdeseinfektion, UV-Härtung, Keimdetektion und Fototherapie.*

*Das FBH deckt bei Laserdioden und LEDs die gesamte Wertschöpfungskette ab. Zunächst werden die optischen und elektrischen Eigenschaften der GaN-basierten Bauelemente simuliert und anschließend die Heterostrukturen mittels Metallorganischer Gasphasen-Epitaxie (MOVPE) hergestellt. Die fertig prozessierten Chips werden dann auf Wärmesenken oder in Gehäuse montiert, ihre elektrooptischen Eigenschaften vermessen, Langzeitstresstests durchgeführt und komplette Module und Systeme als Demonstratoren für Anwendungen aufgebaut. Das FBH arbeitet dabei im Rahmen seines „Joint Labs GaN-Optoelektronik“ eng mit der Arbeitsgruppe „Experimentelle Nanophysik und Photonik“ der TU Berlin zusammen. Zudem gibt es enge Kooperationen mit einer Reihe in- und ausländischer Industriepartner. 2014 wurden zahlreiche neue Projekte gestartet, unter anderem zur Entwicklung brillanter, violett-emittierender Laserdioden im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Land Berlin und dem Nationalen Zentrum für Forschung und Entwicklung in Polen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung effizienter UV-B- und UV-C-LEDs im Rahmen des BMBF-geförderten Konsortiums „Advanced UV for Life“.*

*GaN-Laserdioden wurden im vergangenen Jahr am FBH technologisch weiterentwickelt und limitierende Aspekte physikalisch besser verstanden. Während in der Epitaxie das Wachstum auf GaN-Substraten verschiedener Hersteller untersucht wurde, wurde bei der Chipprozessierung unter anderem eine laserassistierte Technologie zur Wafervereinzelnung entwickelt. Die Hauptzielwellenlängen der Laser liegen nunmehr bei 386 nm und 405 nm, wobei reproduzierbar Schwellenstromdichten von 3 kA/cm<sup>2</sup> oder darunter erreicht werden. Erstmals wurden GaN-Trapezlasers realisiert und ihr Chipdesign systematisch untersucht. Gleichzeitig wurden die verfügbaren Basistechnologien für die Herstellung von Laserdioden mit verteilter Rückkopplung weiter ausgebaut.*

*Bei UV-B-LEDs erzielte das FBH gemeinsam mit der TU Berlin große Fortschritte hinsichtlich Ausbeute und Zuverlässigkeit. In Langzeitstresstests zeigten die Bauelemente selbst bei vergleichsweise hohen Stromdichten Lebensdauern von über 10.000 Stunden. Ein Benchmarking mit kommerziell verfügbaren UV-LEDs ergab bei den UV-B-LEDs international konkurrenzfähige Werte. Eine Ausgründung zur kommerziellen Herstellung derartiger LEDs ist bereits in Vorbereitung. Zugleich wurde weiter an UV-LEDs für den Einsatz in der Gassensorik mit einer Emission im tiefen UV-C-Bereich unterhalb von 240 nm gearbeitet. Bei einer Peakwellenlänge von 234 nm zeigen die LEDs optische Leistungen von bis zu 15 µW bei 20 mA. Damit konnten Projektpartner des FBH erfolgreich Konzentrationen von Stickstoffmonoxid (NO) im ppm-Bereich nachweisen.*

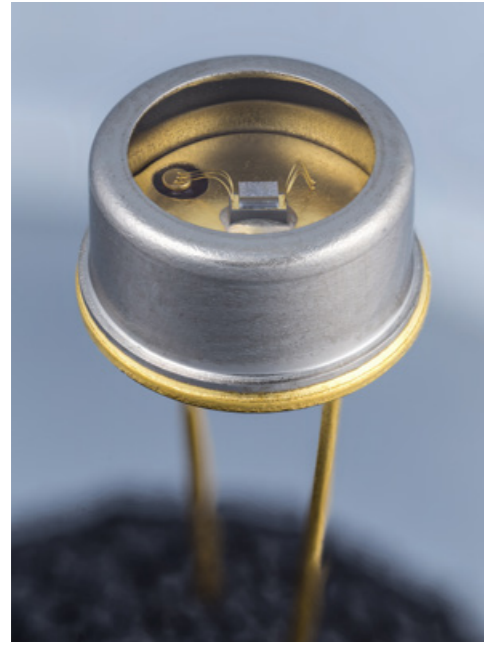
Innovative light sources based on gallium nitride (GaN) semiconductors and its alloys with aluminum nitride (AlN) and indium nitride (InN) are the core focus of the GaN Optoelectronics Business Area. Unlike any other materials system, (AlGaIn)N enables to realize optoelectronic devices whose emission and detection wavelengths cover the entire visible spectrum, additionally extending into the deep ultraviolet (UV) spectral region. Our activities aim to continuously improve the device performance, e.g., increasing output power levels and long-term stability. In addition, novel optoelectronic devices are developed, such as light emitting diodes (LEDs) emitting below 240 nm and violet-emitting laser diodes with simultaneously high power and high beam quality. Research and development activities focus on laser diodes and laser amplifiers emitting in the violet, UV-A, and UV-B spectral range, as well as LEDs for the UV-B and UV-C range, and solar-blind UV photodetectors. Custom devices are developed together with industrial partners for a wide range of application, e.g., atom and molecule spectroscopy, gas sensing, water disinfection, UV curing, detection of multi-resistant germs, and phototherapy.

All research activities regarding laser diodes and LEDs at the FBH are organized along the entire value chain. First, the optical and electrical properties of the GaN-based devices are simulated, and subsequently the heterostructures are fabricated by metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE). The processed chips are then mounted onto heat sinks or into packages. Finally, the electro-optical properties of the devices are measured, long-term stress tests are performed, and complete modules and systems are built as demonstrators for various applications. Within the “Joint Lab GaN Optoelectronics”, the FBH intensively works together with the “Experimental Nanophysics and Photonics” group at TU Berlin. The business area also closely cooperates with numerous national and international industrial partners. In 2014, various new research projects have been started, including the development of brilliant violet-emitting laser diodes within the framework of a collaboration between the State of Berlin and the Polish National Center for Research and Development. Further emphasis is on the development of efficient UV-B and UV-C LEDs as part of the Advanced UV for Life consortium, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

In the last year, we further advanced the technology of GaN-based laser diodes along with obtaining a better understanding of the physical aspects limiting device performance. Whereas on the epitaxy side the growth on GaN substrates from various vendors was investigated, a laser-assisted technology for dicing the wafers was developed for chip processing. The main target wavelengths of the lasers by now are 386 nm and 405 nm. Threshold current densities below 3 kA/cm<sup>2</sup> are routinely obtained for these wavelengths. For the first time, tapered lasers based on GaN have been realized and systematically studied with respect to their chip design. At the same time, the available base technologies for the fabrication of distributed feedback (DFB) laser diodes have been expanded.

In collaboration with the TU Berlin, remarkable progress has been made regarding yield and reliability of UV-B LEDs. Based on long-term stress tests, the devices achieve life-times of more than 10,000 hours even when operated at comparably high current densities. A benchmarking with commercial UV LEDs approved internationally competitive key figures for the inhouse-developed UV-B LEDs. Thus, a spin-off company to commercialize the fabrication of UV-B LEDs is under way. At the same time, FBH has continued its work on UV LEDs to be used in gas sensing, featuring an emission in the deep UV-C region below 240 nm. LEDs with an emission at 234 nm are now available offering optical powers of up to 15 µW at 20 mA. With these devices, our project partners have successfully detected nitrogen monoxide (NO) with low concentrations in the ppm range.

## High-power UV-B LEDs with long lifetimes



Flip-chip mounted UV-B LED in a TO can.

Ultraviolet (UV) light emitting diodes (LEDs) based on the aluminum-nitride (AlN) and gallium-nitride (GaN) material system and its alloy  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  offer access to a great variety of applications. Their emission can be used, for example, in sensing equipment to detect gases or germs. A typical medical application is phototherapy, in which UV-B light is used to treat skin diseases like psoriasis. UV-B LEDs can be utilized in materials processing for the curing of polymers as well as the hardening of inks and varnishes, and in plants their light is known to enhance the growth of health-promoting secondary metabolites. They can also be employed for disinfection purposes of water, surfaces, and air. Currently, some of these applications rely on bulky and toxic mercury discharge lamps. LEDs have distinct advantages compared to conventional lamp technology including the option to set the emission wavelength according to the specific application by changing the material composition. Furthermore, LEDs are compact, non-toxic, show little heat emission, and can be modulated and dimmed. The low operation voltage makes mobile and point-of-use applications possible.

So far, the UV-B spectral range, which covers wavelengths between 280 and 320 nm, has been a range in which LEDs showed a comparably poor performance. Recently, the FBH in collaboration with the Institute of Solid State Physics at TU Berlin has achieved significant progress in the development of high-power UV-B LEDs with emission wavelengths ranging between

285 and 315 nm. Technology steps leading to this advancement included improvements of both the epitaxial heterostructure and the chip processing. The defect density in the LED heterostructure has been reduced by optimizing an AlGaN template layer on planar c-plane sapphire, resulting in an increased internal quantum efficiency of up to 20 %. Optimization of the electron blocking heterostructure improved the injection of electrons and holes into the quantum well active region while electron leakage to the p-side of the LED was suppressed, resulting in reduced parasitic emission at longer wavelengths. The front-end wafer processing has been improved by using stepper lithography instead of contact lithography. A new design for the p- and n-contacts combines better lateral current spreading with a larger area used for emission, thus reducing the current density, improving the heat spreading, and reducing the degradation. After dicing the LED chips, they have been flip-chip mounted on AlN ceramic submounts for efficient heat extraction from the chip and enhanced light extraction. Hermetical housing in TO cans with UV-transparent glass windows allowed us to shield the chip from humidity and physical damage, thus increasing the range of potential applications.

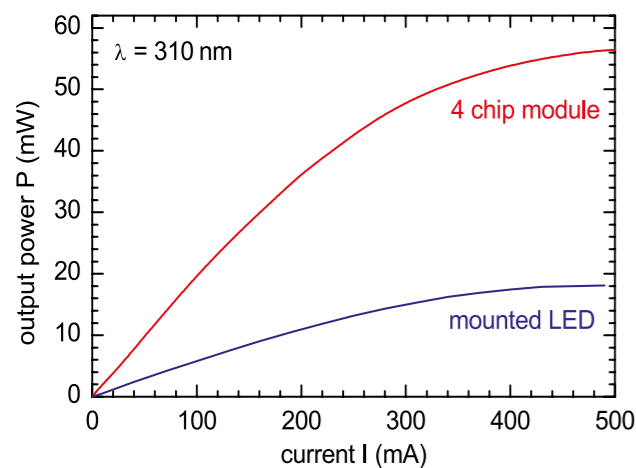


Fig. 1. 310 nm LED with more than 18 mW emission power from a single chip and more than 50 mW from a module of four chips.

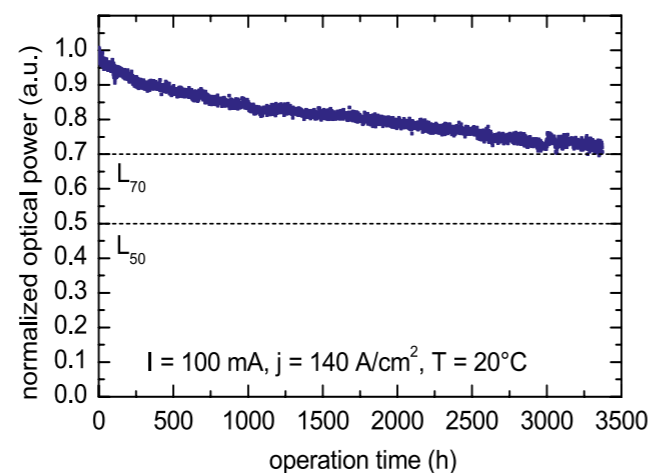
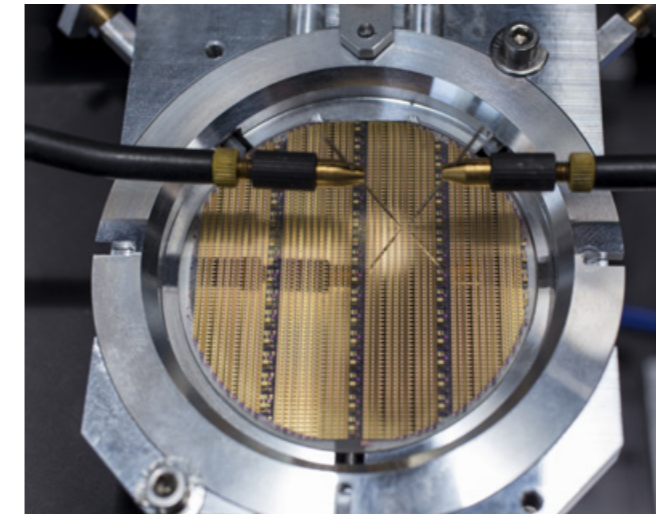


Fig. 2. The emitted power of a 310 nm LED operated at 100 mA decreased by less than 30 % over 3,500 hours, proposing high  $L_{50}$  lifetimes of more than 10,000 hours.

By working on those crucial parts of the semiconductor device, UV-B LEDs with a maximum output power of more than 18 mW per chip at 310 nm have been realized. A module of 4 chips showed more than 50 mW, making those LEDs suitable sources for many of the aforementioned applications. The operation voltage has been reduced to 8 V at 20 mA.

One very crucial aspect of LEDs, especially of UV LEDs, has always been their operation lifetime. The devices are known to show a continuous decrease of output power over time at constant current operation, reducing their efficiency and making their utilization difficult in some fields of application. Mechanisms that can influence the degradation of LEDs include the migration or diffusion of point defects, such as nitrogen vacancies and magnesium as well as the degradation of metal contacts. Lifetime measurements of 305 nm LEDs over 3,500 hours at 100 mA operation current (about 5 mW initial emission power) showed a continuous reduction of the output power. While in the first 100 hours the decrease was strongest, it saturated later on. After 3,000 hours the output power was reduced by less than 30 %, resulting in a  $L_{70}$  lifetime of approximately 3,500 hours and an extrapolated  $L_{50}$  lifetime above 10,000 hours. This excellent performance enables to utilize those LEDs in applications requiring robust UV-B light sources.



On-wafer measurement on a 2" wafer with 2,500 LED chips.

### Publications

J. Rass, T. Kolbe, N. Lobo Ploch, T. Wernicke, F. Mehnke, C. Kuhn, J. Enslin, M. Guttman, C. Reich, J. Glaab, C. Stoelmacker, M. Lapeyrade, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl, "High power UV-B LEDs with long lifetime", Proc. SPIE 9363, 93631K (2015).

J. Glaab, C. Ploch, R. Kelz, C. Stoelmacker, M. Lapeyrade, N. Lobo Ploch, J. Rass, T. Kolbe, S. Einfeldt, F. Mehnke, C. Kuhn, T. Wernicke, M. Weyers, M. Kneissl, "Temperature induced degradation of InAlGaN multiple-quantum well UV-B LEDs", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 1792 (2015).

A. Knauer, U. Zeimer, V. Küller, M. Weyers, "MOVPE growth of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  with  $x = 0.5$  on epitaxial laterally overgrown AlN/sapphire templates for UV-LEDs", phys. stat. sol. (c), vol. 11, no. 3-4, pp. 377-380 (2014).

A. Mogilatenko, V. Küller, A. Knauer, J. Jeschke, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, "Defect analysis in AlGaN layers on AlN templates obtained by epitaxial lateral overgrowth", J. Cryst. Growth, vol. 402, pp. 222-229 (2014).

AlGaN-basierte UV-LEDs eröffnen aufgrund ihrer spezifischen Vorteile zahlreiche Anwendungen in den Bereichen Sensorik, Medizin, Materialbearbeitung, Pflanzenwachstum sowie Desinfektion. In der Vergangenheit zeigten UV-B-LEDs (280 - 320 nm) jedoch vergleichsweise niedrige Effizienzen. Nun ist es dem FBH gelungen, diese Bauelemente erheblich weiterzuentwickeln. Mit einem defektreduzierten AlGaN-Template auf Saphir konnte die interne Quanteneffizienz erhöht werden, während eine optimierte Heterostruktur die Ladungsträgerinjektion in die aktive Zone verbesserte. Zudem wurde ein effizienter Prozess mit Projektionslithografie entwickelt und die Geometrie der Kontakte für eine homogene Strominjektion wurde optimiert. Die Chips wurden auf AlN-Submounts montiert und teilweise in TO-Gehäuse verpackt, was die Lichtauskopplung und Robustheit der LEDs erhöhte. 310 nm LEDs mit einer Ausgangsleistung von bis zu 18 mW pro Chip und mehr als 50 mW im LED-Verbund konnten so realisiert werden. Die LEDs haben Betriebsspannungen von 8 - 10 V; ihre Ausgangsleistung fiel in Alterungstests bei 100 mA (5 mW Anfangsleistung) in 3.000 Stunden um weniger als 30 %. Dies entspricht Lebensdauern von 3.500 Stunden ( $L_{70}$ ), beziehungsweise mehr als 10.000 Stunden ( $L_{50}$ ).

## Pushing the wavelength limits of UV-C LEDs

Light emitting diodes (LEDs) providing wavelengths in the deep ultraviolet (UV) spectral region below 240 nm are particularly interesting for sensing applications. In particular, gases like ammonia and nitrogen oxide (NO) can be detected with sensitivities in the part-per-billion range by properly adjusting the emission wavelength of the LEDs. However, only few groups have been able to realize UV LEDs at these short wavelengths, and no commercial supplier is offering such devices. Currently, the performance of deep UV-C LEDs is limited due to various challenges. One issue is the high density of extended defects in AlGaIn materials, particularly threading dislocations limiting the efficient radiative recombination of carriers. In addition, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers with high aluminum mole fractions ( $x > 80\%$ ) are required to develop deep UV LEDs. Due to the large ionization energies for acceptors and donors as well as compensation effects, n- and p-type doping of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers pose a big challenge. Furthermore, light extraction from the LED chip is inhibited by predominant TM polarization, which favors the emission in-plane of the chip rather than normal to its surface. FBH and TU Berlin are currently developing deep UV-C LEDs emitting below 240 nm in close collaboration with industry partners. These joint efforts cover the complete value chain, from device simulation, epitaxy, and chip processing to mounting and LED testing.

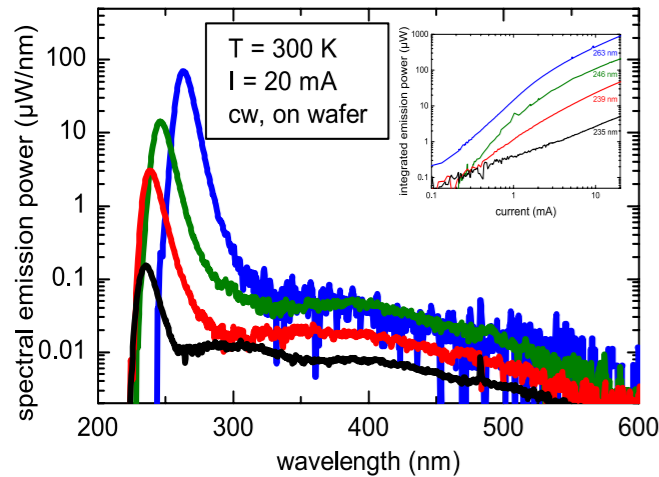


Fig. 1. Emission spectra and optical power-current characteristics of UV-C LEDs with various peak wavelengths.

When processing these wafers to bottom-emitting LED chips, the fabrication of metal contacts to the n-side of the heterostructure becomes a challenge. Even with excellent conductivities in the range of  $10^{-2} \Omega\text{cm}$  for Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N:Si layers with  $x \sim 85\%$ , the large bandgap of the material makes the formation of low resistance ohmic contacts quite difficult. After optimizing the n-metal contacts and annealing schemes a contact resistivity of  $10^{-1} \Omega\text{cm}^2$  was achieved. Nevertheless, the current density distribution across the active area of the LED chip remains non-uniform. This effect was studied by finite element simulations as well as spatially resolved electroluminescence measurements. Fig. 2a shows one of the chip

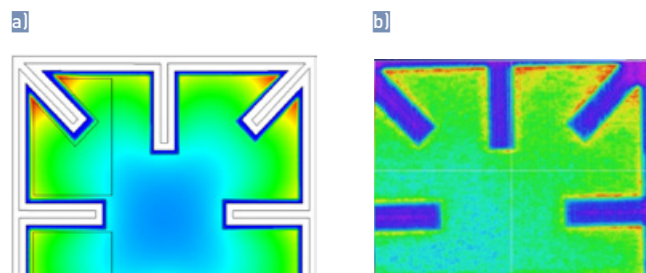


Fig. 2. Distribution of the relative electroluminescence intensity over the p-contact area of a 234 nm LED – simulation (a) and measurement (b).

The UV-LED heterostructures were grown on epitaxially laterally overgrown (ELO) AlN/sapphire templates with threading dislocation densities in the mid  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  range. With respect to the design of the UV-LED heterostructure, an undesirable long-wavelength emission turned out to be hard to avoid. The long-wavelength peak was attributed to parasitic emission from Mg-doped AlGaIn layers and could be partially suppressed by incorporating a novel AlN/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N electron blocking heterostructure. This structure suppresses electron leakage from the active region while still maintaining good hole injection. The emission spectrum in optimized structures is clearly dominated by the multiple quantum well (MQW) emission with parasitic luminescence accounting for less than 10 % of the total emission power. In on-wafer measurements, UV-C LEDs emitting between 263 nm and 235 nm could be demonstrated with output powers ranging from 0.9 mW to 4.4 µW at 20 mA, as shown in Fig. 1.

layouts with  $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$  chip size and eight n-contact fingers extending perpendicularly or diagonally into the  $390 \mu\text{m} \times 390 \mu\text{m}$  p-contact area. Although the uniformity of the current flow benefits from the finger design, the optical power density still varies by a factor of 4. This effect can also be found in the experimental data shown in Fig. 2b.

Deep UV-C LED chips have been fabricated by standard photolithography, dry etching as well as the deposition of passivation and metallization layers. After wafer thinning, laser scribing was used to dice the wafers into individual UV-LED chips, which were subsequently flip-chip mounted

on different ceramic submounts and holders as shown in Fig. 3a. Typical characteristics of a 234 nm LED are shown in Fig. 3b. The total optical power of the device is about  $1.5 \mu\text{W}$  at 20 mA, and the spectral power density for 40 mA is about  $5 \text{ nW/nm}$  at 227 nm. These values are difficult to judge since similar devices are not available on the market to make a fair comparison. Nevertheless, FBH's external partners set up a gas absorption system with LEDs featuring a total optical power between  $20 \mu\text{W}$  and  $50 \mu\text{W}$  at 20 mA with a main peak at 236 nm. They succeeded to detect 500 ppm NO in nitrogen with this system. Further improvements of the sensitivity are expected through superior optical band-pass filters and by using a second LED wavelength for referencing.

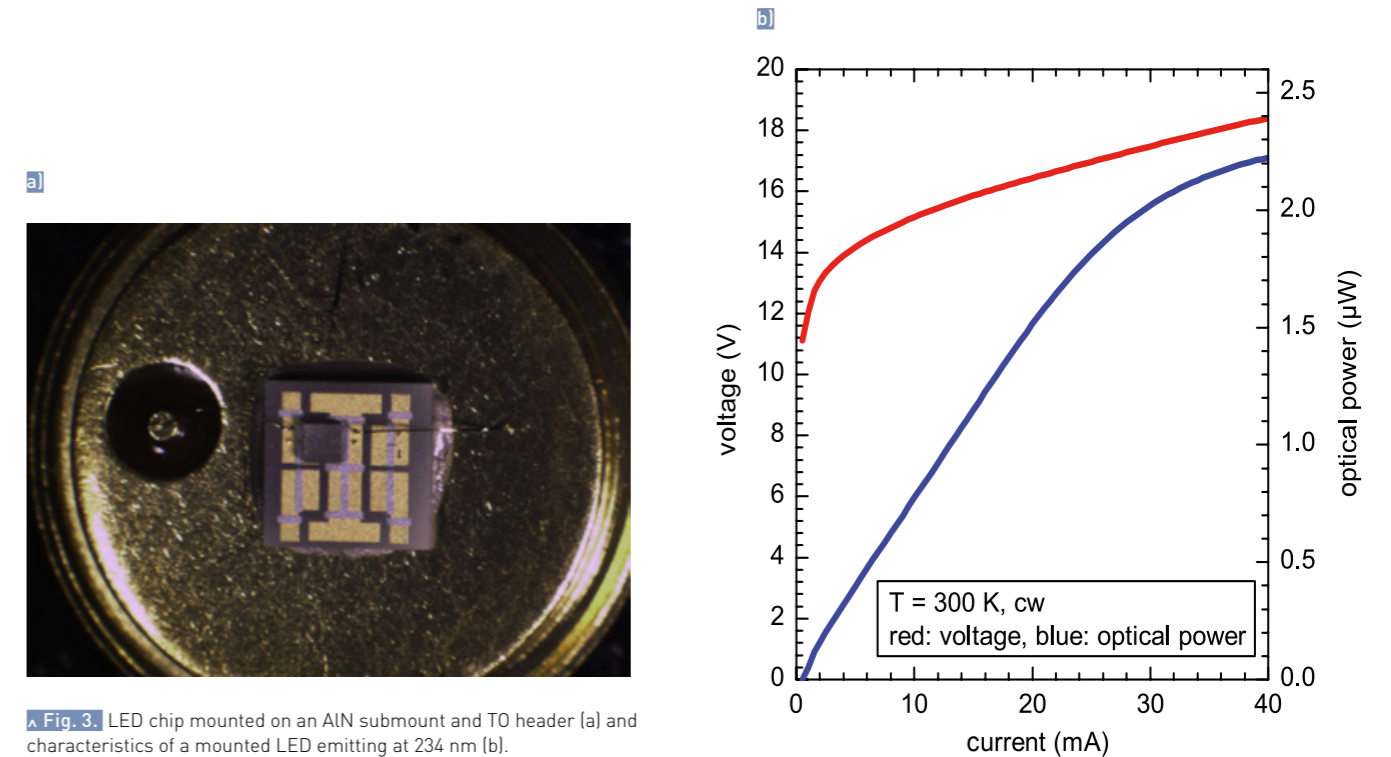


Fig. 3. LED chip mounted on an AlN submount and TO header (a) and characteristics of a mounted LED emitting at 234 nm (b).

Leuchtdioden (LEDs) mit Emissionswellenlängen im tiefen ultravioletten Spektralbereich unterhalb von 240 nm eignen sich besonders, um ausgewählte Gase zu detektieren. Die entsprechenden Bauelemente hat das FBH in enger Kooperation mit der TU Berlin entwickelt. Dabei wurden die Epitaxiestrukturen insbesondere bezüglich ihrer Defektdichte und ihres Dotierprofils optimiert, um unerwünschte langwellige Emissionen zu unterdrücken. Weiterhin wurde die Chiptechnologie hinsichtlich Ohm'scher Kontakte auf AlGaIn mit extrem breiter Bandlücke weiterentwickelt. Auch die Uniformität der Stromverteilung über den LED-Chip wurde untersucht. Montierte LEDs mit 234 nm Peakwellenlänge lieferten eine optische Leistung von etwa  $1,5 \mu\text{W}$  bei 20 mA Strom. Diese LEDs wurden von externen Partnern des FBH in ein Gasabsorptionssystem integriert, mit dem es gelungen ist, Stickstoffmonoxid in ppm-Konzentrationen nachzuweisen.

### Publication

F. Mehnke, C. Kuhn, M. Guttman, C. Reich, T. Kolbe, V. Küller, A. Knauer, M. Lapeyrade, S. Einfeldt, J. Rass, T. Wernicke, M. Weyers, M. Kneissl, "Efficient charge carrier injection into sub-250 nm AlGaIn multiple quantum well light emitting diodes", Appl. Phys. Lett. 105, 051113 (2014).

## Narrow-band InGaN MQW laser diodes for the blue-violet spectral region

Optical technologies have proven to successfully contribute to a wide range of applications such as medical diagnostics, environmental sensing, life sciences, and others. Many of these applications require compact and narrow linewidth laser sources. Such lasers have been realized in the IR and red spectral region using distributed Bragg reflector (DBR) and distributed feedback (DFB) laser diodes. However, very few studies have been conducted on GaN-based DFB laser diodes emitting in the blue-violet spectral region because of a multitude of challenges, including very small corrugation periods. In order to realize DFB laser diodes we have investigated a new approach based on high order surface gratings. The processing technology for such gratings is much more straightforward compared to epitaxially overgrown gratings of low order.

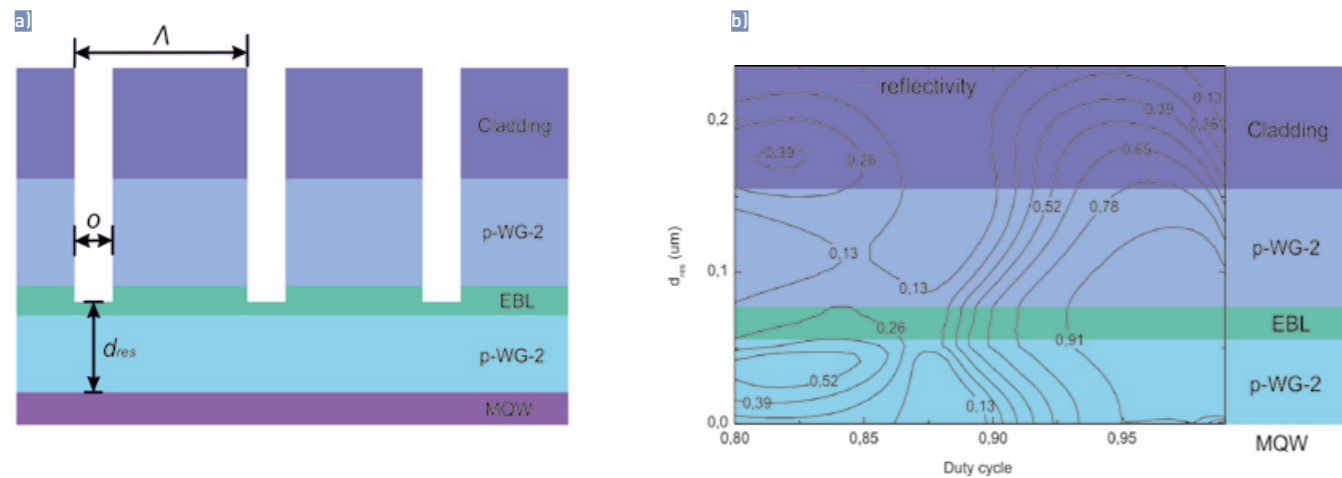


Fig. 1. (a) Schematic image of the surface grating structure and (b) simulated maximum reflectivities of a 600  $\mu\text{m}$  long, 10<sup>th</sup> order Bragg grating as a function of  $d_{\text{res}}$  and  $D$  at a Bragg wavelength of about 405 nm.

At FBH, we have started comprehensive studies on the design and the fabrication of surface gratings which are to be used for the successful realization of GaN-based DFB lasers. Based on advanced simulations, the range of duty cycles ( $D = [\Lambda - o]/\Lambda$ ) and residual layer thicknesses from the active region ( $d_{\text{res}}$ ) of rectangular-shaped gratings – which result in a high reflectivity – have been specified (compare Fig. 1a). A reflectivity spectrum for different combinations of  $D$  and  $d_{\text{res}}$  was calculated, and the peak reflectivity was evaluated using the software package CAMFR. The results for a 600  $\mu\text{m}$  long 10<sup>th</sup> order Bragg grating are shown in Fig. 1b. There are several regions with a reflectivity larger than 0.4. A high reflectivity beyond 0.9 is achieved for  $d_{\text{res}} = 0.05 \sim 0.08 \mu\text{m}$  and  $D = 0.93 \sim 0.99$ . The high duty cycle  $> 0.9$

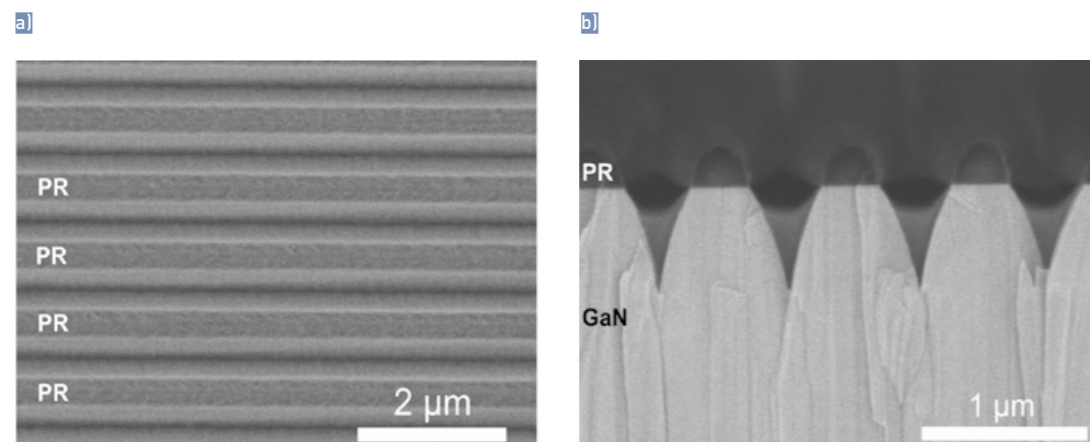


Fig. 2. (a) Top view and (b) cross-sectional SEM image of V-shaped grating structures.

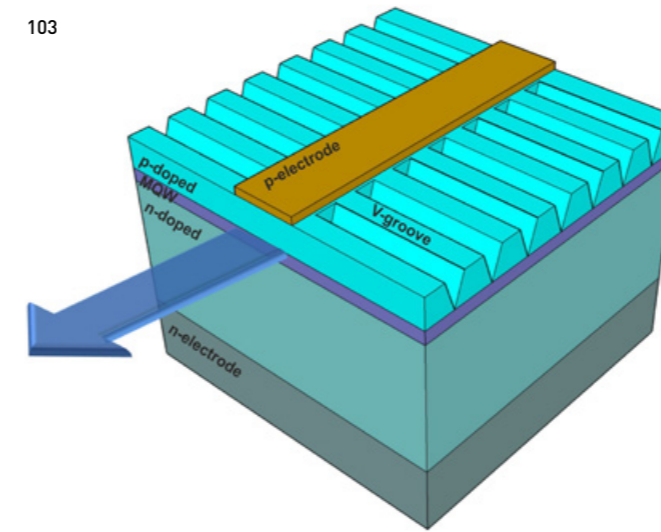


Fig. 3. Schematic of the proposed laterally coupled DFB laser diode.

corresponds to narrow grooves (width  $< 80 \text{ nm}$ ) which need to be etched in the semiconductor surface. However, the fabrication of an etch mask with extremely narrow openings is limited by the resolution of the lithography process. In order to use optical lithography and keep the fabrication technology simple, we propose a new approach based on a surface grating structure of high order. V-shaped grooves are targeted to fabricate Bragg gratings with a high effective duty cycle  $> 0.9$  at the bottom of the groove.

V-shaped gratings were successfully fabricated in GaN by using i-line wafer stepper lithography and a reactive ion etching process using  $\text{BCl}_3$  plasma as shown in Fig. 2. Slanted sidewalls of the etched grooves were obtained by exploiting the re-deposition of etching products and mask faceting. Heavy ions from  $\text{BCl}_3$  and a large bias enhance the physical sputter-etching and promote re-deposition effects. The slant angles of the V-shaped grooves are strongly related to the opening width of the resist mask

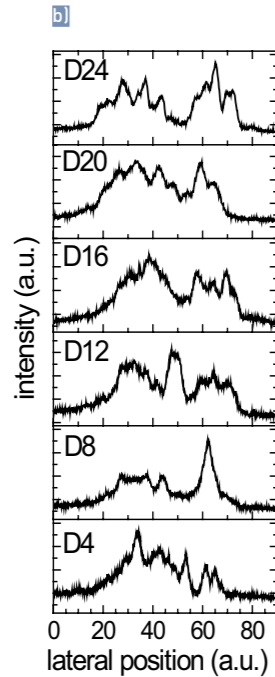
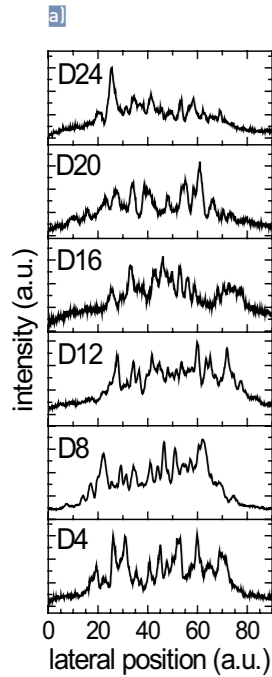
and the plasma power. Moreover, the etch depth in the grooves is almost independent of the etching time once the V-shape is formed. The period of the resist pattern was fixed at 801 nm (10<sup>th</sup> order) and the opening width after plasma etching at the top of the groove was around 425 nm. The etch depth was around 600 nm, i.e., the tip of the V-groove was around 0.05  $\mu\text{m}$  above the MQW layer, which corresponds to a maximum reflectivity. Assuming that the mode will mostly overlap with the tip of the V-shaped grooves, the relevant slant angle of the grooves was around 15°. The width of the tip of the V-shaped groove was in the order of 10 nm. Thus, a technology for fabricating V-shaped grooves is now available and should allow for a grating reflectivity  $> 0.9$ .

Our current work aims at optimizing surface gratings that are laterally coupled to ridge waveguides, see Fig. 3. This concept offers the advantage of separating the current injection region from the grating region, similar to a DBR laser, which is hard to realize due to strong optical absorption in non-pumped active regions of a GaN-based laser structure. Although the realization of GaN-based DFB lasers poses a great technological challenge, FBH is well on the way to demonstrate first optically pumped lasers with high order surface gratings.

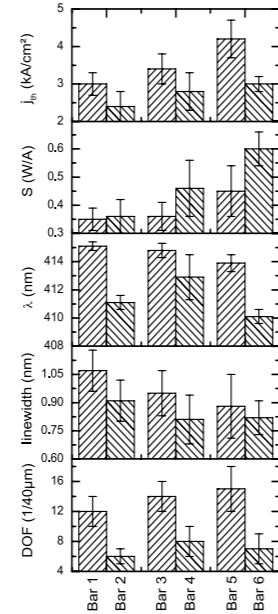
Die Realisierung von DFB-Laserdioden auf der Basis von GaN ist sehr anspruchsvoll, weil dafür üblicherweise Bragg-Gitter mit sehr kleiner Periode verwendet werden. Das FBH verfolgt nun mit der Simulation und Herstellung von Oberflächengittern hoher Ordnung in GaN einen alternativen Ansatz. Letztlich sollen damit Rippenwellenleiter-Laserdioden mit lateral gekoppelten Bragg-Gittern entstehen. Die theoretischen Untersuchungen zeigen, dass solche Gitter hohe Reflektivitäten von deutlich über 0,9 aufweisen können, wenn die Tiefe und das Aspektverhältnis der Gitterfurchen präzise eingestellt werden. Entsprechende Strukturen wurden am FBH experimentell realisiert unter Verwendung konventioneller optischer Lithografie und eines neu entwickelten Plasmaätzprozesses. Durch Steuerung der Redeposition beim Plasmaätzen über die Plasmaleistung wurden V-förmige Gitterfurchen erzeugt, die bei der gewünschten Tiefe von 600 nm nur etwa 10 nm breit sind.

# Near field filamentation in violet (Al,In)GaN laser diodes

Blue-violet (Al,In)GaN based laser diodes emitting around 410 nm have already found their way into various commercial applications. When aiming for high-power devices, the emitting laser cross-section has to be enlarged to reduce the power density and protect the facets from catastrophic optical damage. This is normally achieved by using broader contact stripes, which, in turn, aggravates the influence of lateral inhomogeneities in the laser structure and leads to the formation of several lateral intensity minima and maxima in the laser beam. This effect is known as filamentation. The critical parameter here is the uniformity of the refractive index, which depends on the local carrier density and temperature.



**Fig. 1.** Lateral near field distributions of different laser diodes with 40  $\mu\text{m}$  contact stripe width from bar 1 (a) and bar 2 (b).



**Fig. 2.** Comparison of mean  $j_{th}$ , S,  $\lambda$ , FWHM, and DOF for laser bars with resonator lengths of 1000  $\mu\text{m}$  (1&2), 800  $\mu\text{m}$  (3&4), and 600  $\mu\text{m}$  (5&6).

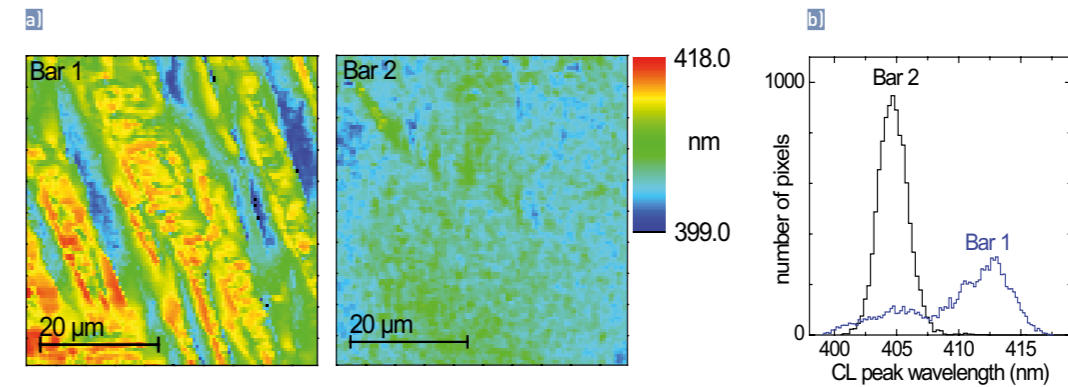
We have investigated the lateral filamentation of laser diodes on three pairs of bars from the same 2-inch GaN wafer. Each pair had the same resonator length and was thus comparable. The laser diodes were operated under pulsed pump current conditions to prevent heating effects. Pump current and voltage as well as the optical power and the intensity profile at the laser facet, the near field, have been measured. Fig. 1 shows the lateral laser near fields of two bars from different wafer areas. Lasers from one bar show comparable near field characteristics with similar number and spacing of the intensity maxima. In contrast, lasers from different bars show significant deviations in the filamentation characteristics. To quantify this impression, the degree of filamentation (DOF) is defined as the number of significant intensity maxima per 40  $\mu\text{m}$  [the width of the laser contact stripes]. The mean DOF for bar 1 in Fig. 1 is  $12 \pm 2$ , while for bar 2 it is only half the size ( $6 \pm 1$ ), thus verifying the previous statements.

To investigate the influence on other laser characteristics, the threshold current density  $j_{th}$ , slope efficiency S, peak wavelength  $\lambda$ , and spectral linewidth FWHM (full width at half maximum) of the laser diodes have also been measured. In Fig. 2 the mean values and the DOF are compared. It can be seen that in every single of the three cases the bar with the higher DOF also exhibits a higher  $j_{th}$ , lower slope efficiency S, broader FWHM, and redshifted wavelength  $\lambda$ .

To clarify the reasons for these observations, spectrally and spatially resolved cathodoluminescence (CL) measurements of the samples were conducted at 80 K. Representative maps of the quantum well peak emission wavelength for bars 1 and 2 are shown in Fig. 3a. It is evident that the emission wavelength of bar 1 is spatially much more inhomogeneous than that of bar 2. The corresponding histograms in Fig. 3b confirm this observation. While bar 2

shows one narrow peak with a FWHM of only 2.7 nm, bar 1 exhibits a broader emission with two distinct peaks. The observed wavelength variations can be explained by either a varying quantum well thickness or indium content. Which of the two effects is more influential cannot be determined from our data. Either way, it is not important for the explanation of the observed effects. The influence of band gap fluctuations on  $j_{th}$ , S,  $\lambda$ , and FWHM of quantum well laser diodes has been simulated by Vurgaftman et al. (IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 3, 475, 1997). The calculations show that band gap fluctuations increase  $j_{th}$  because of lower differential gain and reduce S due to enhanced free carrier absorption in the active region and reabsorption of photons emitted from wide band gap regions in small band gap regions. Additionally,  $\lambda$  is red-shifted because carriers diffuse to regions of low band gap before recombining and the FWHM broadens because of a higher number of excited longitudinal modes.

These predictions agree very well with the experimental results presented here and confirm that the observed variations of the laser parameters are indeed caused by the nonuniformities of the quantum wells. The different DOF values can also be explained since strong variations of the band gap energy reduce the carrier diffusion length, which is a critical parameter for the filament width. Combining these results, we can now understand the interplay of epitaxial layer uniformity, basic laser parameters, and filamentation effects. This is an important step towards the improvement of high-power (Al,In)GaN-based laser diodes.



**Fig. 3.** Areal maps of the CL peak emission wavelength at 80 K for bar 1 and bar 2 (a), corresponding histogram of emitted wavelengths (b).

Blau (Al,In)GaN-basierte Laserdioden sind in vielfältigen Anwendungen kommerziell nutzbar. Jedoch zeigen Dioden hoher Leistung aufgrund ihres breiten emittierenden Bereichs häufig ausgeprägte Intensitätsschwankungen im lateralen Strahlprofil. Diese werden durch Inhomogenitäten im Brechungsindex verursacht, etwa aufgrund einer inhomogenen Ladungsträgerdichte oder Temperatur. Dieses Filamentierung genannte Phänomen haben wir an verschiedenen Laserbarren, die alle von einem Epitaxiewafer stammen, untersucht. Es hat sich gezeigt, dass eine stärkere Filamentierung mit einem höheren Schwellenstrom, geringerer Steilheit sowie einer spektral breiteren, rotverschobenen Emission korreliert. Sämtliche Effekte können auf Unterschiede in der Homogenität der Quantenfilme zurückgeführt werden, die über Kathodolumineszenzmessungen nachgewiesen wurden. Die erhöhte Filamentierung bei inhomogenen Quantenfilmen wird durch eine verringerte Diffusionslänge der Ladungsträger verursacht.

## Publication

J. Jeschke, U. Zeimer, L. Redaelli, S. Einfeldt, M. Kneissl, M. Weyers, "Effect of quantum well non-uniformities on lasing threshold, linewidth, and lateral near field filamentation in violet (Al,In)GaN laser diodes", Appl. Phys. Lett. 105, 173501 (2014).

For further information:



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

# Materials & Processes

## *Materialien & Prozesse*

**Business Areas & Research**  
Geschäftsbereiche & Forschung

## Materials & Processes

### Materialien & Prozesse

Der Schwerpunkt der Aktivitäten in Technologieentwicklung und Materialforschung am FBH liegt auf der Vorlaufforschung zu Materialien und Prozessen. Sie liefert die technologischen Voraussetzungen für die gezielte Entwicklung von Bauelementen in den anderen Forschungsbereichen. Intensiv wird an Materialien auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) gearbeitet, die in Leistungsbauelementen für Mikrowellen- und Leistungs-Schaltanwendungen, ultraviolett (UV) emittierenden Leuchtdioden (LEDs), Laserdioden und UV-Fotodetektoren zum Einsatz kommen. Ein Beispiel für die Materialforschung sind Wachstumsprozesse für GaN-basierte Hochvolt-Leistungstransistoren. Zur Herstellung der nitridischen Epitaxieschichten mittels Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) stehen zwei Mehrscheiben-Epitaxieanlagen (AIX 2600 G3 HT) und eine kleinere Einzelwafer-Anlage für explorative Untersuchungen zur Verfügung. Damit können insbesondere Prozesse für bipolare Bauelemente mit p-Dotierung (LEDs, Laserdioden) von solchen für unipolare Bauelemente (GaN-HFETs, Fotodetektoren) getrennt bearbeitet werden. Dazu kommt eine weitere, kleinere Multiwafer-Anlage an der TU Berlin, die für die gemeinsamen Aktivitäten zu UV-LEDs genutzt wird. Auch an defektarmen AlN- und AlGaIn-Schichten als Grundlage für UV-Bauelemente wird geforscht. GaN-Substrate sind von zentraler Bedeutung, insbesondere für GaN-basierte Laserdioden. GaN-Kristalle, aus denen solche Substrate herausgeschnitten werden können, werden am FBH mittels Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) gezüchtet. Die HVPE wird auch eingesetzt, um dicke AlGaIn-Schichten als Templates für UV-LEDs abzuscheiden. Ein besonderer Fokus liegt auf der Kontrolle von Verspannungen bei GaAs-basierten Strukturen, da diese die Bauelementparameter und die Prozessierbarkeit der Wafer entscheidend beeinflussen.

Im Bereich der Prozesstechnologie entwickelte das FBH 2014 neben der etablierten Technologie für GaAs-Laserdioden seine Prozessmodule für die Fertigung von GaN-basierten Hochleistungstransistoren, InP-Heterobipolartransistoren (HBTs) sowie GaN-basierten LEDs und Lasern weiter. Hauptziele waren dabei Verbesserungen der Reproduzierbarkeit, Ausbeute und Zuverlässigkeit. 2014 wurde ein neuer Reaktor zum behutsamen Ätzen von Gatestrukturen für Bauelemente, die auf Anwendungen bei 33 - 50 GHz abzielen, in Betrieb genommen. Mithilfe eines Sensors zur in-situ Überwachung der Waferkrümmung konnte der ICP-Ätzprozess von Vias in SiC verbessert werden. Auch die Fertigungsschritte zum Erzeugen optischer Gitter bei GaAs- und GaN-Lasern mittels Elektronenstrahlolithografie und Plasmaätzen wurden optimiert. Es wurden Anstrengungen unternommen, die Vereinzelung GaN-basierter UV-LEDs und -Laser mittels Laserritzen und Spalten zu verbessern.

Gemeinsam mit Forschungs- und Industriepartnern bearbeitet das FBH zahlreiche Projekte: Unter anderem wurden im vergangenen Jahr (Al)GaN-basierte UV-Fotodetektoren für die Materialcharakterisierung weiter optimiert. Die Kooperation zur Fertigung von robusten Siliziumkarbid-Fotodetektoren wurde erfolgreich fortgesetzt.

Die Transfer-Substrat (TS)-Technologie zur Realisierung von InP-basierten HBTs wurde 2014 erfolgreich weiterentwickelt. Mit einem adaptierten Transfer-Substrat-Prozess wurden Diamantschichten integriert, die den Wärmewiderstand des Gesamtaufbaus signifikant senken. Neuartige Flip-Chip-Aufbauten für Anwendungen im sub-THz-Bereich zeigten im Test exzellente Hochfrequenzeigenschaften.

Im Rahmen der gemeinsamen Aktivitäten mit dem Leibniz-Institut für Innovative Mikroelektronik zur dreidimensionalen Heterointegration von InP-HBTs in einen Silizium-CMOS-Prozess werden neue Funktionalitäten erschlossen ("more than Moore"). Durch Kombination der beiden komplementären Technologien entstehen neuartige hybride Chips für höhere Leistungen im THz-Bereich, die in Zukunft auch für externe Kunden als Foundry-Service nutzbar sein werden.

Activities in the development of materials and technology are focused on exploring materials and process modules, paving the way to fabricate advanced devices. The Materials Technology and Process Technology Departments provide the technological preconditions to develop devices that are realized in the respective research areas. Materials based on gallium nitride (GaN) are subject of intensive research and are utilized for power transistors for microwave and power switching applications as well as laser diodes, UV LEDs, and UV photodetectors. For example, epitaxial layers for GaN power transistors optimized for high operating voltages are based upon the development of corresponding processes in metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE). The variety of different device structures is grown in two multi-wafer reactors (AIX 2600 G3 HT) and a smaller single-wafer machine for explorative work. This allows separating the developments regarding bipolar devices with p-doped layers (LEDs, laser diodes) from those of unipolar devices (GaN-HFETs and UV photodetectors). Another small multi-wafer system at TU Berlin is used in the joint work on UV LEDs. Also, AlN and AlGaIn layers with reduced defect density for UV LEDs are being developed. GaN substrates are of pivotal importance, especially for GaN-based laser diodes. At FBH, GaN crystals for such substrates are grown using hydride vapor phase epitaxy (HVPE). HVPE is also applied to deposit thick AlGaIn layers as templates for UV LEDs. A special focus is on controlling tensile strain in GaAs structures, as they significantly influence device parameters and processability.

In 2014, besides refining mature process modules for GaAs-based lasers, reliable and robust processes for GaN-based high-power transistors, InP-based hetero bipolar transistors (HBTs), and GaN-based LEDs and lasers were further developed. High reproducibility, yield, and reliability remain the main objectives here. A new reactor for gentle etching of transistor gates, e.g., for applications targeting 33 - 50 GHz, was put into operation. Using a sensor for in-situ monitoring of wafer curvature allowed us to optimize the ICP etching conditions for through-substrate vias in 4" SiC. Furthermore, process steps to pattern optical gratings for GaAs and GaN lasers by electron beam lithography and plasma etching were further optimized. The FBH also continued to optimize die separation by laser scribing and breaking of UV LEDs and GaN laser diodes.

Customer-related wafer processes and analysis of device structures continued to be an integral part of FBH's work in the materials and processes field. We advanced joint projects with research and industrial partners. (Al)GaN photodetectors, for instance, both as device and tool to characterize epitaxial layers have been further developed. The ongoing R&D cooperation dealing with robust silicon carbide photodetectors is equally fruitful.

In 2014, the transferred substrate (TS) approach for InP-based HBTs could be further advanced. Heat dissipation from InP-HBTs was significantly improved by integrating a diamond layer employing the TS technology. A novel flip-chip assembly for applications in the sub-THz range revealed excellent RF properties of the interconnects.

In collaboration with the Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP), the TS technology has been further advanced with regard to three-dimensional hetero-integration of InP-HBTs into silicon-germanium BiCMOS to access new functionality ("more than Moore"). Combining these complementary technologies leads to novel hybrid chips reaching higher power levels in the THz range. A common design kit has just been developed to offer a foundry service that gives customers in research and industry access to the synergetic semiconductor technology.



# Bottom illumination of solar-blind AlGa<sub>x</sub>N MSM photodetectors – tailoring the polarization effects to achieve EQE up to 70 %

Photodetectors (PD) based on the Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N material system with cut-off wavelengths ranging from the UV-A to the UV-C spectral range are suitable candidates to monitor a variety of UV applications. These range from water purification, disinfection, sterilization, photo-chemical curing, and lithography to flame detection. Unique properties of this material system are the adjustable direct band gap and the high radiation hardness. The metal-semiconductor-metal (MSM) type PDs, as compared to pin and Schottky diodes, offer a simple fabrication process, since no doped layers or Ohmic contacts and no mesa etching are required. However, the main drawback of such MSM PDs under illumination from the metal side (top illumination) is the loss of incident photons due to shading caused by the electrodes. This can be minimized either by a suitable electrode design or simply by illumination from the substrate side (bottom illumination) – alternatively, a combination of both.

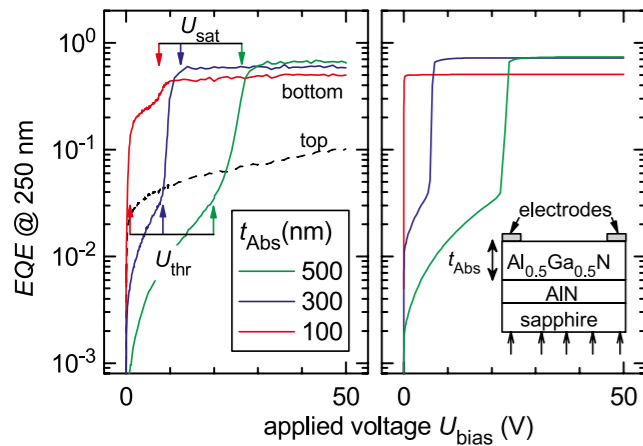


Fig. 1. Experimental (l.) and modeling (r.) data EQE-bias dependence for Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N MSM PDs with different absorber thicknesses  $t_{Abs}$  under bottom illumination, inset: sample structure.

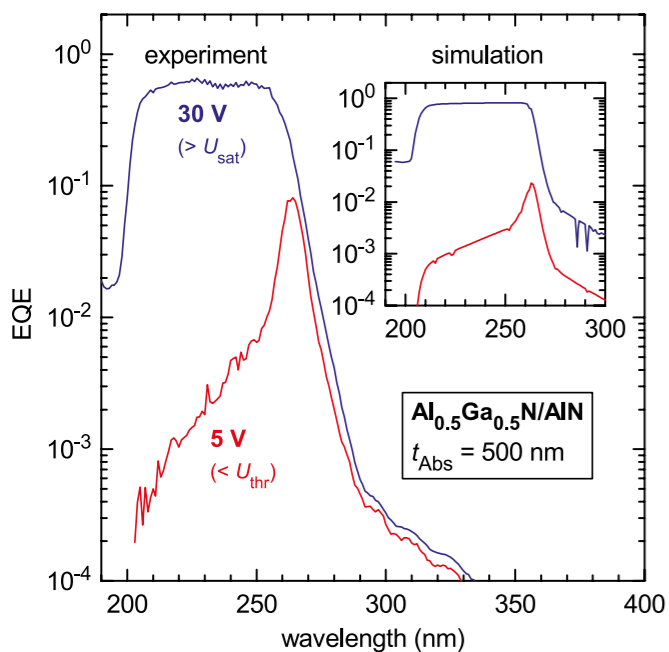


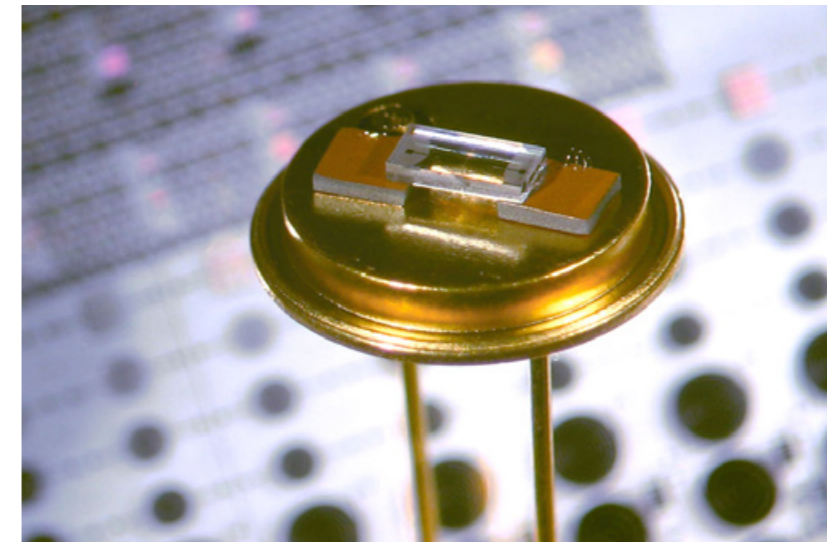
Fig. 2. Spectral dependence of the EQE of an Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N MSM PD with 500 nm absorber thickness under bottom illumination below  $U_{thr}$  and above  $U_{sat}$ , inset: corresponding modeling results.

alternatively, a combination of both.

We have investigated the external quantum efficiency (EQE) of solar-blind Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N MSM photodetectors under top and bottom illumination. Three samples were grown by MOVPE on c-sapphire/AlN templates with different absorber layer thicknesses  $t_{Abs}$  of 0.1  $\mu\text{m}$ , 0.3  $\mu\text{m}$ , and 0.5  $\mu\text{m}$ , respectively (see Fig. 1). Under top illumination the PDs on the 500 nm absorber show the expected characteristics of an MSM PD, i.e., a square-rooted bias dependence reaching state-of-the-art EQE values of 10 % at 50 V. For bottom illumination a different behavior has been found in our experiments. The EQE at a wavelength of 250 nm shows a strong increase above threshold bias  $U_{thr}$  as well as saturation above bias  $U_{sat}$  with a high EQE above 50 %. Generally, the values for  $U_{thr}$ ,  $U_{sat}$ , and  $EQE_{sat}$  diminish with decreasing thickness  $t_{Abs}$ . To our knowledge, this behavior has not been reported so far.

As shown in Fig. 2 for 500 nm absorber thickness, the spectral shape of the EQE can be tuned between a peak near the Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N band edge at about 265 nm below threshold ( $U_{bias} < U_{thr}$ ) and a broad band spectrum in the saturation regime ( $U_{bias} > U_{sat}$ ). The cut-off visible at about 210 nm is due to absorption in the AlN buffer layer that acts as a filter. By means of two-dimensional numerical drift-diffusion calculations we gained insights in the underlying physical processes determining the device performance. Considering the effects of spontaneous and piezoelectric polarization in an AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N layer stack, the threshold and saturation behavior as well as the corresponding spectra for the bottom-illuminated MSM PDs reproduce the experimental trends very well (see Figs. 1 and 2). We conclude that the interplay between the high polarization field originating near the AlN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N interface and the bias-dependent electric field below the contact leads to minimized recombination losses throughout the structure, i.e., a highly efficient transversal and lateral sweep-out of the photo-generated excess charges.

In conclusion, the concept of bottom-illumination results in record-high EQE levels up to 70 % for solar-blind Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-based MSM-type photodetectors. Above a certain threshold voltage a sudden increase of the EQE to very high saturation levels can be observed. Here, the thickness of the Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N absorber layer essentially influences the values for threshold voltage and saturation level. Additionally, the response can be switched from a selective one at the band gap energy at low bias to a flat broadband response above the band gap. These findings pave the way for the production of easy-to-fabricate and highly efficient Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N MSM photodetectors for several applications in the UV spectral range.



Flip-chip mounted solar-blind MSM photodetector based on Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N.

Metall-Halbleiter-Metall UV-Fotodetektoren, die unempfindlich gegen Tageslicht sind (solarblind), werden am FBH auf der Basis von AlGa<sub>x</sub>N realisiert. Ihre externe Quanteneffizienz (EQE) ist dabei bei Beleuchtung von der Unterseite (durch das transparente Substrat) deutlich größer als bei Beleuchtung von oben. Auf dieser Basis konnte mit einer nur 500 nm dicken Detektorschicht die EQE auf über 70 % bei 30 V Vorspannung gesteigert werden. Experimentell wurde ein Schwell- und Sättigungsverhalten der EQE in Abhängigkeit von Spannung sowie Absorberschichtdicke beobachtet. Dieses Verhalten konnte anhand von Simulationsrechnungen nachvollzogen werden. Der spektrale Verlauf der EQE kann dabei durch die Vorspannung zwischen wellenlängenselektiver Detektion an der Absorptionskante und breitbandiger Detektion bis zu kürzeren Wellenlängen eingestellt werden. Dies ermöglicht neue Anwendungen zum Nachweis ausgewählter Wellenlängenbereiche.

## Publications

M. Brendel, M. Helbling, A. Knauer, S. Einfeldt, A. Knigge, M. Weyers "Top- and bottom-illumination of solar-blind AlGa<sub>x</sub>N metal-semiconductor-metal photodetectors", phys. stat. sol. (a), vol. 212, no. 5, pp. 1021-1028 (2015).

A. Knigge, M. Brendel, U. Zeimer, M. Helbling, A. Knauer, F. Brunner, V. Küller, S. Einfeldt, M. Weyers, "Enhanced quantum efficiency of AlGa<sub>x</sub>N photodetectors by patterned growth", phys. stat. sol. (a), vol. 212, no. 5, pp. 1005-1010 (2015).

# High-quality semi-polar GaN on 100 mm diameter patterned sapphire

High-power light-emitting diodes (LEDs) based on GaN and related compounds suffer from an efficiency reduction at high current densities. A popular explanation is that Auger recombination dominates the non-radiative loss mechanisms at high injection currents. One approach to solve this issue is to increase the thickness of the light-emitting quantum well (QW) region, which reduces the current density in that area. However, polarization-induced internal fields in c-oriented material cause band bending and, as a consequence, a separation of the electron and hole wave function limiting the usable QW thickness. A way out of this restriction is the use of non- or semi-polar GaN orientations, where strongly reduced internal fields allow for thicker QW regions in high-power devices. In particular, LEDs with high In content in the active device region enabling direct green and yellow emission should benefit from the non-polar orientation. Since non-c-plane bulk GaN substrates are limited in size and availability, the need for low-cost large area non- or semi-polar GaN templates is apparent. While direct growth of non- or semi-polar GaN on planar sapphire or silicon is hampered by the incorporation of extended defects, the use of patterned substrates is auspicious. A promising approach is the inclined growth in c-direction on the sidewall of trench-patterned r-plane sapphire which results in semi-polar  $(11\bar{2}2)$ -oriented GaN after coalescence. While this strategy has already been employed successfully on 2" substrates, the transfer to larger sapphire diameters had to be demonstrated.

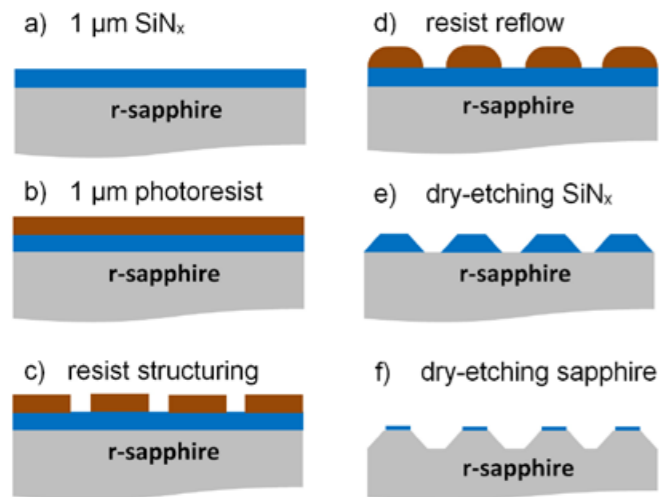


Fig. 1. General process flow for patterning 100 mm diameter r-plane sapphire substrates.

Within the European project 'ALIGHT' the development and supply of high-quality semi-polar  $(11\bar{2}2)$ -GaN templates on 100 mm diameter substrates were tasks to be solved by the FBH. Upscaling to a larger substrate diameter was therefore part of combined efforts towards efficient cost-cutting LEDs for solid-state lighting applications. Since 100 mm diameter r-plane patterned sapphire substrates (r-PSS) are not commercially available, an industry-compatible sapphire patterning process was developed. To achieve this, trench patterning was accomplished by plasma etching using a slanted  $\text{SiN}_x$  mask that is formed by a resist reflow process. A thin  $\text{SiN}_x$  layer remaining on the r-plane sapphire served as a growth mask for the subsequent epitaxial overgrowth. The general process flow is depicted in Fig. 1. The stripes are oriented perpendicular to the projection of the c-direction on the r-plane sapphire. Stripe and trench width dimensions are in the order of  $4 \mu\text{m}$  and  $1 \mu\text{m}$ , respectively.

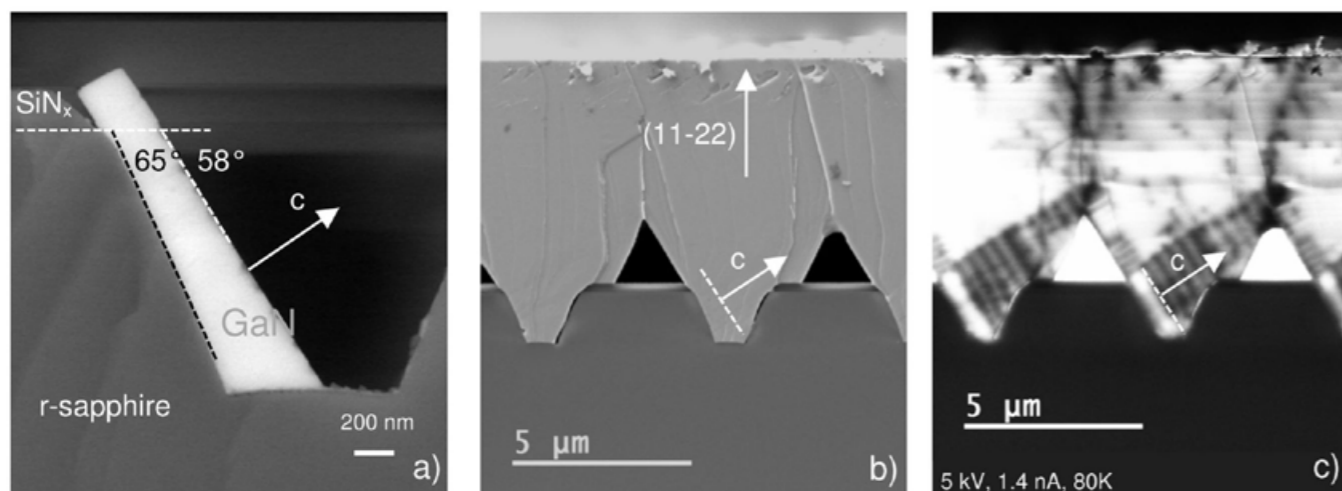


Fig. 2. Cross-section SEM pictures of GaN grown for 5 min. (a) and 2 hours (b), resulting in  $\sim 7 \mu\text{m}$  final layer thickness, c) low-temperature cathodoluminescence intensity map of the area shown in b).

Epitaxial growth was carried out in an AIX2600G3-HT MOVPE system equipped with a LayTec EpiCurveTT-AR<sup>®</sup> sensor. Fig. 2a shows a cross-section SEM image of GaN grown for 5 minutes on the c-like oriented r-sapphire sidewall. As can be seen, the GaN facet shows a preferential c-orientation pointing to the fact that the c-facet is energetically favorable and develops in a self-organized way. The MOVPE growth conditions were then changed to promote lateral growth resulting in stripe coalescence after approximately  $3 \mu\text{m}$  (Fig. 2b). Defect analysis using low-temperature cathodoluminescence (Fig. 2c) revealed reduced defect propagation in the semi-polar material compared to the polar c-direction. Resulting threading dislocation densities in the coalesced semi-polar material are of the order of  $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  on average. The density of basal stacking faults is about  $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$  and comparable to published values of  $(11\bar{2}2)$ -GaN grown on 2" substrates.

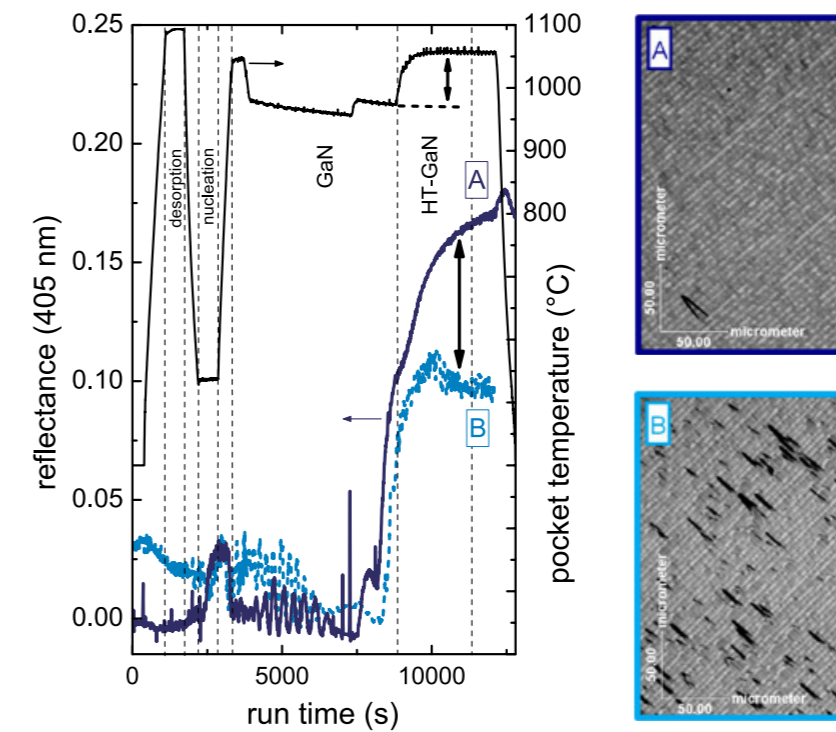


Fig. 3. a) In-situ measured reflectance (@405 nm) of  $(11\bar{2}2)$ -GaN grown on r-PSS with (A) and without (B) a GaN cap layer grown at higher temperature. b) Optical microscopy images of semi-polar  $(11\bar{2}2)$ -GaN showing a different density of arrow-head defects.

Im Rahmen des EU-Projektes 'ALIGHT' wurden erfolgreich semi-polare  $(11\bar{2}2)$ -GaN-Schichten auf Streifen-strukturierten r-Saphir-Substraten mit einem Durchmesser von 100 mm entwickelt. Die Strukturierung erfolgte durch Plasmaätzen über eine geeignete  $\text{SiN}_x$ -Maskenflanke, welche durch einen eigens entwickelten Lackumschmelzprozess lithografisch hergestellt wurde. Auf diesen strukturierten Substraten wurde in einem Multiwafer-MOVPE-Reaktor GaN zunächst mit hoher Selektivität auf den etwa  $60^\circ$  geneigten c-orientierten Seitenfacetten gewachsen. Anschließend wurden durch geeignete Wachstumsparameter eine Koaleszenz und ein Wachstum der semi-polaren Orientierung forciert. Koaleszenz-Zeitpunkt und morphologische Schichteigenschaften wurden durch in-situ-Messungen der Reflexion optimiert. Die mithilfe von Kathodolumineszenz-Messungen bestimmten strukturellen Eigenschaften entsprechen veröffentlichten Daten auf 2-Zoll-Substraten. Die Dichte der Durchstoß-Versetzungen liegt bei  $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , die der basalen Stapelfehler liegen in der Größenordnung  $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ . Im Ergebnis konnten semi-polare GaN-Saphir-Quasibsubstrate mit 100 mm Durchmesser an Projektpartner zur Entwicklung von LED-Wachstumsprozessen geliefert werden.

## Publication

F. Brunner, U. Zeimer, F. Edokam, W. John, D. Prasai, O. Krüger, M. Weyers, "Semi-polar  $(11\bar{2}2)$ -GaN templates grown on 100 mm trench-patterned r-plane sapphire", phys. stat. sol. (b), vol. 252, no. 5, pp. 1189-1194 (2015).

## Hydride vapor phase epitaxy of bulk-like AlGaN layers

Numerous applications, such as curing of coatings, disinfection, stimulation of plant growth, and new printing technologies, are based on irradiation with UV-B light (290 - 340 nm). AlGaN LEDs are compact and potentially very efficient devices for such applications. However, the external quantum efficiency of current LEDs is limited dramatically by the poor quality of the semiconductor material. A high dislocation density (TDD) leads to unsatisfactory optical and electrical properties with undesired conversion of energy into heat. The key to reducing the TDD in the device layer structure is to employ substrates with good lattice matching to the device layers and low threading dislocation density.

As one of only a few groups world-wide, we develop hydride vapor phase epitaxy (HVPE) processes to grow AlGaN layers that are supposed to be used as substrates for UV-B LEDs in the future. HVPE with its high growth rate is already successfully used for GaN and AlN. In principle, AlGaN HVPE growth on sapphire is possible since this commercially available substrate material is transparent in the desired wavelength range. However, strain is introduced at the interface between sapphire and AlGaN due to different lattice constants. The resulting stress is even increasing during growth and ultimately leads to cracking of the grown layer, thus limiting AlGaN layer thicknesses on planar sapphire to about 1  $\mu\text{m}$ .

Strain at the interface can be reduced significantly by lowering the contact area to the substrate, for example by masking parts of the surface. This conventional epitaxial lateral overgrowth (ELOG) approach works well for GaN, but the high reactivity of aluminum leads to nucleation on such masks. Thus, for AlGaN, patterned sapphire substrates (PSS) were introduced, which can help to effectively reduce strain via void creation. On stripe patterned substrates the critical layer thickness for cracking was increased to 5  $\mu\text{m}$ . XRD diffraction peak widths were 0.5 degree in both the symmetric (0002) and the skew-symmetric (30-32) reflections. The crack pattern in thicker layers grown on stripe PSS revealed an anisotropic strain relaxation. Thus, more isotropic honeycomb-shaped PSS were fabricated and allowed us to further increase the critical thickness for cracking to above 10  $\mu\text{m}$  and to reduce the width of the symmetric rocking curve further to 0.4 degree.

This peak width indicated that the TDD was still too high, and it was thus necessary to analyze the remaining obstacles. XRD texture analysis showed crystallites with deviant orientations in the honeycombs. Fast growing c-oriented crystallites on n-plane sapphire facets at the bottom of the holes were identified by electron backscatter diffraction (EBSD). They need to be suppressed by an appropriate growth procedure. In sum, void creation has

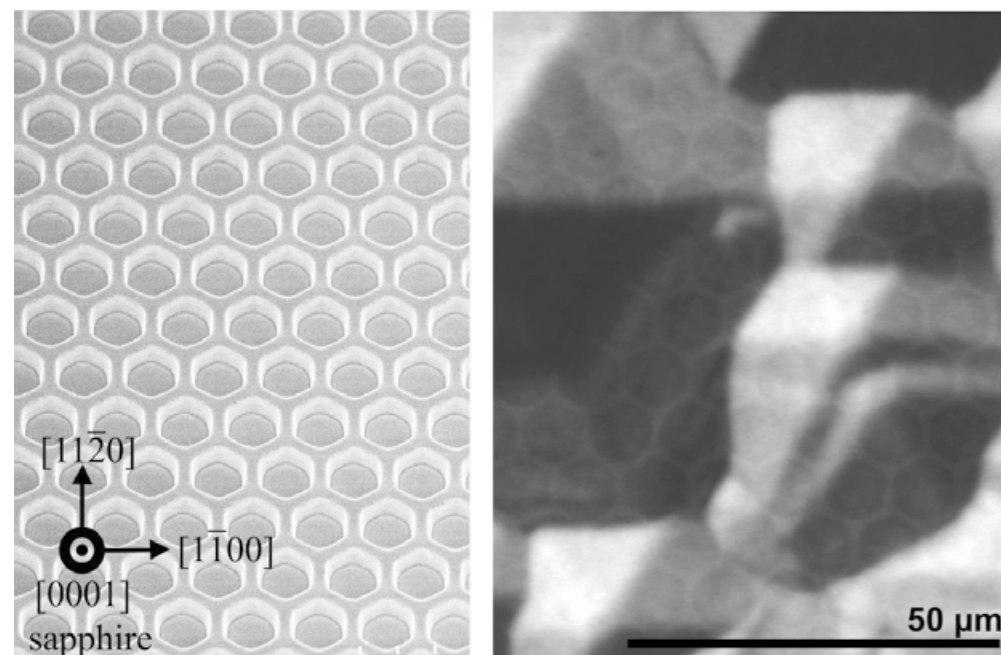


Fig. 1. 30 deg inclined SEM micrograph of honeycomb-patterned sapphire substrate (l.), optical micrograph focused on the interface (r.) of subsequently grown AlGaN layer.

to be further improved, which remains subject of future investigations. However, a further reduction of the XRD peak width down to 0.2 degree for 10  $\mu\text{m}$  thick layers could be achieved by grading the composition from AlN to  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  over the first 5  $\mu\text{m}$ .

The growth of thick AlGaN layers by HVPE could thus be successfully established. Collaboration with external partners providing in-depth analysis by SIMS (RTG Mikroanalyse GmbH), EBSD (Bruker Nano GmbH) and X-ray orientation analysis (HU Berlin) opens paths which make targeted improvements in thickness and quality very likely so that those layers may be used for the fabrication of UV-B LEDs in the future.

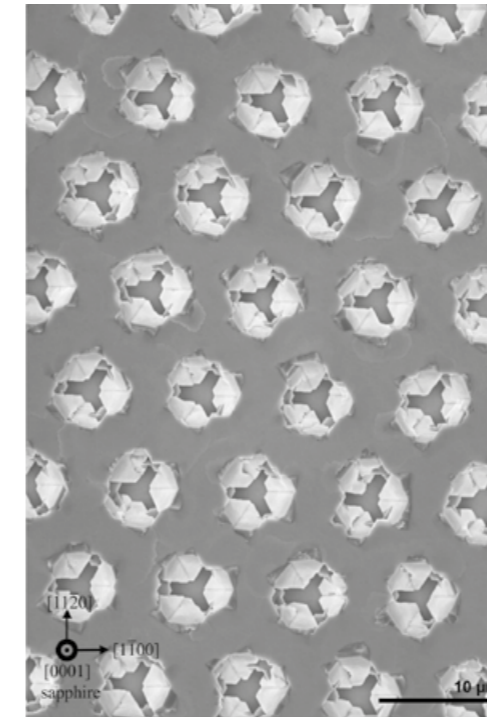


Fig. 2. SEM micrograph of nominally 1.5  $\mu\text{m}$  thin AlGaN layer on honeycomb-patterned sapphire shows AlGaN growth on honeycomb sidewalls.

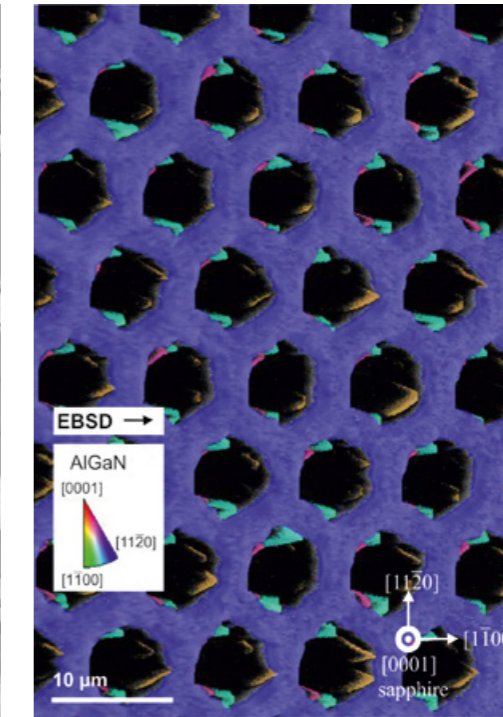


Fig. 3. False color plot of crystal orientations of sapphire and AlGaN crystallites analyzed via electron backscatter diffraction.

Für UV-B-LEDs steht bislang kein geeignetes Substratmaterial kommerziell zur Verfügung. Daher nutzt das FBH die Hydridgasphasenepitaxie (HVPE), um ternäres Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) zu wachsen. Dabei gilt es zunächst, Verspannungen durch die hohe Gitterfehlpassung zwischen Saphirsubstrat und AlGaN-Schicht abzubauen. Mithilfe einer Streifenstrukturierung der Saphiroberfläche ist es dem FBH gelungen, die Kontaktfläche beider Materialien zu verringern. Dadurch ließ sich die Schichtdicke rissfrei gewachsener AlGaN-Schichten von unter 1  $\mu\text{m}$  auf 5  $\mu\text{m}$  erhöhen. Eine weitere Steigerung auf über 10  $\mu\text{m}$  wurde durch die Entwicklung einer isotropen Wabenstrukturierung möglich, gleichzeitig konnte die Materialqualität damit weiter verbessert werden. Die kristallografische Analyse des AlGaN-Wachstum auf den unterschiedlichen Facetten der strukturierten Saphirsubstrate mittels Röntgenbeugung und Elektronenstreuung führte zu einem besseren Verständnis der kristallografischen Beziehung beider Materialien. Dies wiederum wirkt sich direkt auf die weitere Entwicklung der Saphirstrukturierung aus. Um die für Substratanwendungen angestrebte Materialqualität zu erreichen, muss künftig vor allem die Defektdichte weiter verringert werden.

### Publications

S. Fleischmann, A. Mogilatenko, S. Hagedorn, E. Richter, D. Goran, P. Schäfer, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, "Analysis of HVPE grown AlGaN layers on honeycomb patterned sapphire", J. Crystal Growth, 414, 32 (2015).

E. Richter, S. Fleischmann, D. Goran, S. Hagedorn, W. John, A. Mogalitenko, D. Prasai, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, "Hydride Vapor-Phase Epitaxy of c-Plane AlGaN Layers on Patterned Sapphire Substrates", J. Electr. Mat., 43, 814 (2014).

# Strain management in $\text{AlAs}_y\text{P}_{1-y}/\text{GaAs}$ -based distributed Bragg reflectors

$\text{AlAs}/\text{GaAs}$ -based distributed Bragg reflectors (DBR) are used in applications like vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL), saturable absorber mirrors (SAM), and mirrors used in precision metrology. While SAMs are key components in short-pulse laser systems, precision metrology requires high finesse cavities where semiconductor-based DBRs offer excellent noise performance. In order to obtain reflectivities as high as 0.9998 a typical DBR is made of a super-lattice (SL), consisting of alternating quarter-wave GaAs (high index) and AlAs (low index) layers, with at least 25 periods. A higher number of periods increases the reflectivity around the stop band center wavelength. As a downside, the total thickness of a DBR

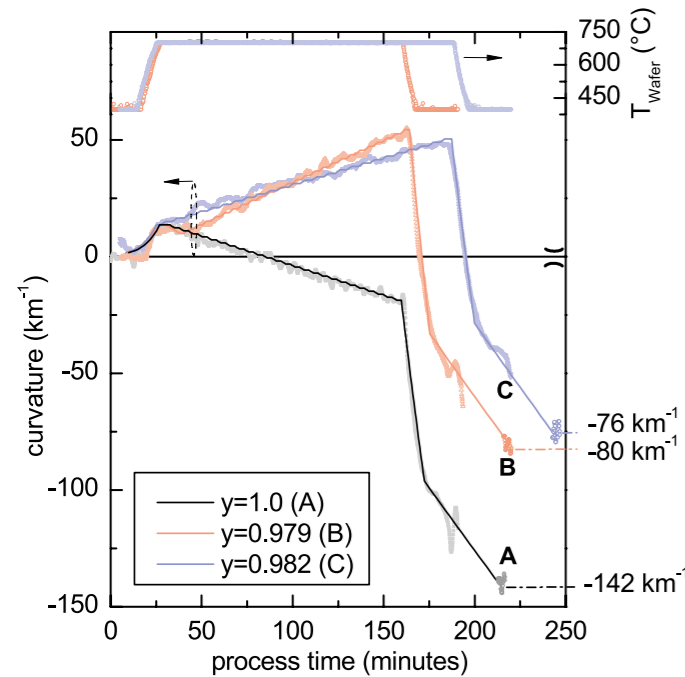


Fig. 1. Measured (symbols) and simulated (lines) in-situ curvature transients during growth of  $\text{AlAs}_y\text{P}_{1-y}/\text{GaAs}$  SLs.

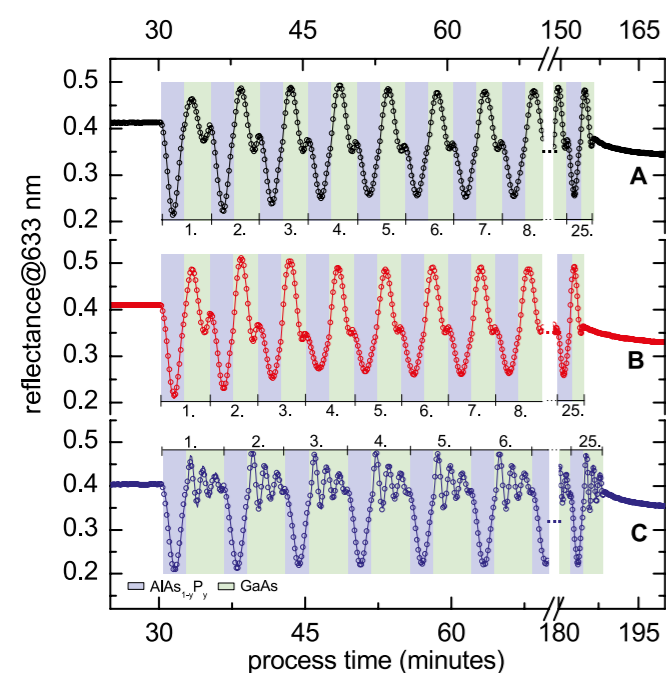


Fig. 2. Measured (symbols) and simulated (lines) in-situ reflectance transients at  $T_{\text{water}} = 700^\circ\text{C}$  for  $\text{AlAs}_y\text{P}_{1-y}/\text{GaAs}$  SLs of samples A, B and C.

easily reaches several microns, which, in combination with a weighted mean aluminum mole fraction  $x_{\text{mean}} > 50\%$ , will result in significant convex wafer bow. This can become a critical issue, especially when curvature is one of the design figures of a mirror (precision metrology). While the room temperature (RT) lattice mismatch between AlAs and GaAs equals  $\Delta a/a = 0.14\%$ , it is much lower at typical growth temperatures ( $T_{\text{water}} \sim 700^\circ\text{C}$ ) with  $\Delta a/a = 0.02\%$ . Hence, the main origin of the RT convex wafer bow is the thermal expansion mismatch – which cannot be easily addressed directly.

Structure A represents a plain AlAs/GaAs DBR with 25 periods of a pair of quarter wave layers (AlAs: 86.5 nm, GaAs: 73.4 nm), having an RT curvature of  $-142\text{ km}^{-1}$ . Fig. 1 shows the curvature which changes its sign after some stacks and drastically increases when the wafer is cooled to RT. The reflectance transients (Fig. 2) allow to resolve the growth of each layer in the stack. From fitting the reflectance transients layer thicknesses can be extracted and together with the curvature strain can be evaluated already during growth. To lower the RT curvature, phosphorus (P) can be added to the AlAs layers of the DBR, forming an  $\text{AlAs}_y\text{P}_{1-y}/\text{GaAs}$  SL. Structure B is an SL where the low-index layers consist of  $\text{AlAs}_{0.979}\text{P}$  (83.4 nm). The curvature transient shows that the layers are under tensile strain during growth and the RT curvature is reduced to  $-80\text{ km}^{-1}$ . However, surface inspection using differential interference contrast microscopy revealed that misfit dislocations had formed already, which means local relaxation has started.

Based on the curvature transient simulation, which was applied to a larger set of samples than what is shown here, a critical upper limit for the strain thickness product ( $\epsilon \times d$ ) can be defined as  $75\%$  nm. According to this, during growth of structure B, whose critical limit was passed after 21 periods have been grown, and  $\epsilon \times d$  finally reaches  $89\%$  nm at the end of the growth. Consequently, for the growth of structure C we reduced the P mole fraction to 1.8% to prevent relaxation during growth. At the same time, we increased the thickness of the high index GaAs layers to 221 nm to further reduce the RT curvature. Structure C therefore represents a combination of quarter wave and triple quarter wave designs, which results in  $x_{\text{mean}} = 28\%$ , while structures A and B have  $x_{\text{mean}} \sim 53\%$ . As Fig. 1 shows, the RT curvature of structure C is further reduced to  $-76\text{ km}^{-1}$ . Together with the lower P content the  $\epsilon \times d$  value of structure C comes out

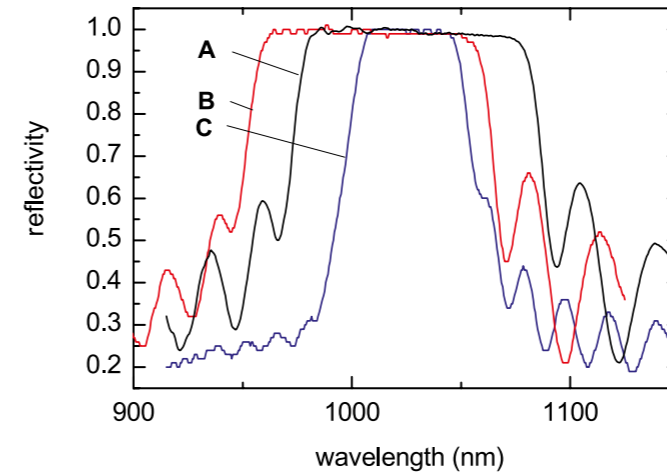


Fig. 3. Room temperature reflectance spectra of all three DBRs. Note the reduced band width of structure C.

at  $61\%$  nm at the end of the growth, which is in line with no misfit dislocations being detectable.

Finally, Fig. 3 shows a comparison of the RT white light interference spectra of all three structures. While structures A and B have a stop band width of  $\sim 100\text{ nm}$ , structure C has a reduced band width of  $\sim 50\text{ nm}$  due to the GaAs thickness being  $\frac{3}{4}\lambda$ . This study allows to tune the curvature of DBR mirror stacks and thus their optimization for a given cavity design.

This work has partially been funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) under contract WE1908/6-1.

**AlAs/GaAs-basierte Bragg Spiegel (DBR) werden vielseitig eingesetzt: in oberflächenemittierenden Laserdioden (VCSEL), sättigbaren Absorberspiegeln und als Spiegel höchster Güte in der Metrologie – wofür sie aufgrund des sehr geringen thermischen Rauschens sehr attraktiv sind. Sie bestehen aus Schichten niedriger (AlAs) und hoher (GaAs) Brechzahl. Die Höhe der Reflektivität wird von der Anzahl der aufgetragenen Schichtpaare von AlAs/GaAs bestimmt. Der mittlere Aluminiumgehalt solcher AlAs/GaAs-Spiegel von  $> 50\%$  führt bei Gesamtdicken von mehreren Mikrometern zu einer merklichen konvexen Waferkrümmung bei Raumtemperatur ( $\kappa_{\text{RT}}$ ). Fügt man zu den AlAs-Schichten Phosphor (P) hinzu, verschiebt sich der Spannungszustand abhängig vom P-Gehalt in Richtung tensil. So lässt sich die Waferkrümmung während des Wachstums gezielt in Richtung konkav verschieben, wodurch die konvexe Krümmung bei Raumtemperatur (RT) entsprechend verringert wird. Diese Art der verteilten Spannungskompensation ist durch einsetzende Versetzungsbildung während des Wachstums limitiert. Dennoch lässt sich  $\kappa_{\text{RT}}$  weiter reduzieren, wenn man die GaAs-Schichten so dimensioniert, dass diese drei Viertel eines vollen Wellenzugs aufnehmen können. Dadurch verringert sich der mittlere Al Gehalt auf  $28\%$  und der Unterschied der mittleren thermischen Ausdehnung zwischen DBR und dem GaAs-Substrat verringert sich. Auf diese Weise konnte die Krümmung eines AlAs/GaAs-DBRs ohne Einbuße an Reflektivität von  $\kappa_{\text{RT}} = -142\text{ km}^{-1}$  auf  $\kappa_{\text{RT}} = -76\text{ km}^{-1}$  verringert werden. Damit lässt sich die Krümmung solcher Spiegel auf das Design von optischen Resonatoren anpassen.**

## Publication

A. Maaßdorf, M. Weyers, "AlAsP-based strain-balancing in MOVPE-grown distributed Bragg reflectors", J. Cryst. Growth, vol. 414, pp. 10-14 (2015).

# SciFab: wafer-level heterointegration of InP DHBT and Si BiCMOS for mm-wave RF electronics

Heterogeneous integration of III-V materials and silicon is a widely researched topic, with the goal to either enhance the performance of silicon transistors (to further follow Moore's law beyond the material limits of silicon) or to add new functionality to the silicon integration ("more than Moore"). In both cases, the advantageous material properties of compound semiconductors are the driving force behind the push for heterogeneous integration. In the present context, the high breakdown voltage of InP heterobipolar transistors along with the high electron velocity in InP are exploited to extend BiCMOS' mm-wave performance towards higher RF output power and higher operating frequencies. In a joint effort, FBH and IHP (Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Frankfurt/Oder) have developed a unique heterointegrated InP DHBT/SiGe BiCMOS process since 2012: InP double-heterobipolar transistors (DHBT) and low-loss high-impedance microstrip wiring are added on top of the bipolar silicon-germanium and silicon CMOS transistor (BiCMOS) stack in a modular fashion, leaving the silicon part

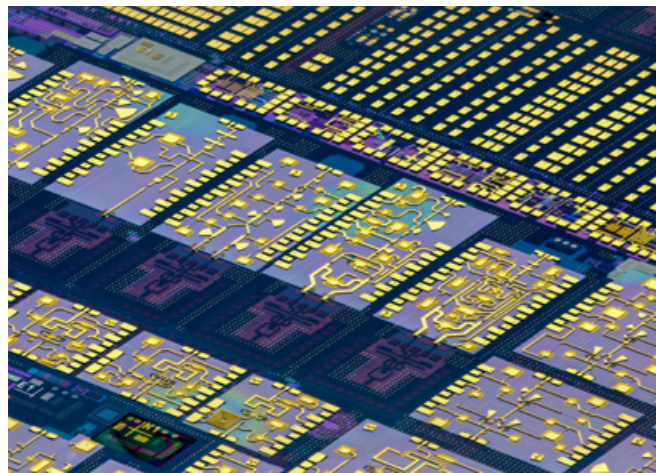


Fig. 1. Photograph of finished InP/BiCMOS wafer surface.

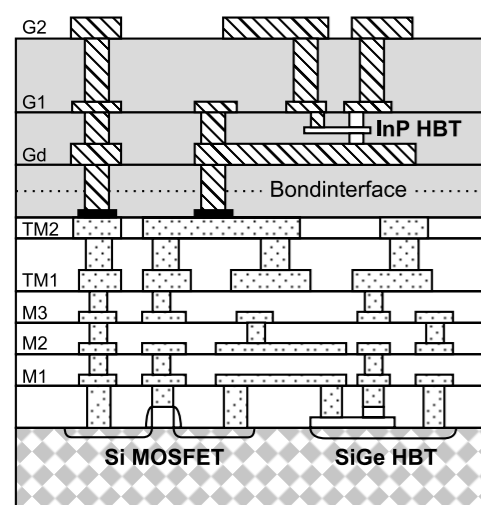


Fig. 2. Schematic vertical cross-section of InP-BiCMOS heterointegrated layer stack.

unaltered except for the final planarization layer. The targeted application frequency range of the current technology node (800 nm InP/250 nm BiCMOS) lies in the mm-wave region between 100 and 350 GHz, enabled by the InP DHBT's cutoff frequencies  $f_t$  and  $f_{max}$  exceeding 320 GHz. Already realized complex integrated mm-wave frequency sources operating up to 328 GHz highlight the added value of InP DHBT and SiGe BiCMOS heterointegration. Additional circuits based on this technology are described on p. 62. Compared to traditional mounting and packaging techniques, the system-on-chip approach leads to reduced packaging cost and hence reduced system size and weight. The shorter interconnect paths between the BiCMOS and InP circuit parts result in reduced RF losses and improved interconnect bandwidth, leading to mm-wave analog circuitry with enhanced power efficiency. Reduced system size, weight, and power are differentiating attributes for targeted mm-wave airborne and space applications.

Upon completion of the BiCMOS process at IHP's facilities, 3" diameter wafers are cored from the 8" BiCMOS substrates and shipped to FBH, where pre-processed InP wafers are joined face-to-face with the BiCMOS substrates in an adhesive wafer bond process. Following wafer bonding, the InP substrate is removed, leaving only the InP epitaxial layers bonded to the silicon BiCMOS wafer. Subsequently, the InP DHBT's collector is defined, the InP transistors are mesa-isolated, and the gold-benzocyclobutene (BCB) multilayer interconnect structure is formed, including thin-film capacitors. Microstrip transmission lines, linear couplers, and inductive structures of arbitrary shape can be realized in the electroplated gold interconnect layers. The critical electrical connection between InP and BiCMOS subcircuits demonstrates less than 0.5 dB insertion loss across the full band from DC to 320 GHz.

In 2014, a number of process and layout changes were implemented to boost the die and wafer yield as well as the device uniformity from a first demonstration to acceptable levels for small-series wafer fabrication. Tightened interconnect design rules could be attained with the introduction

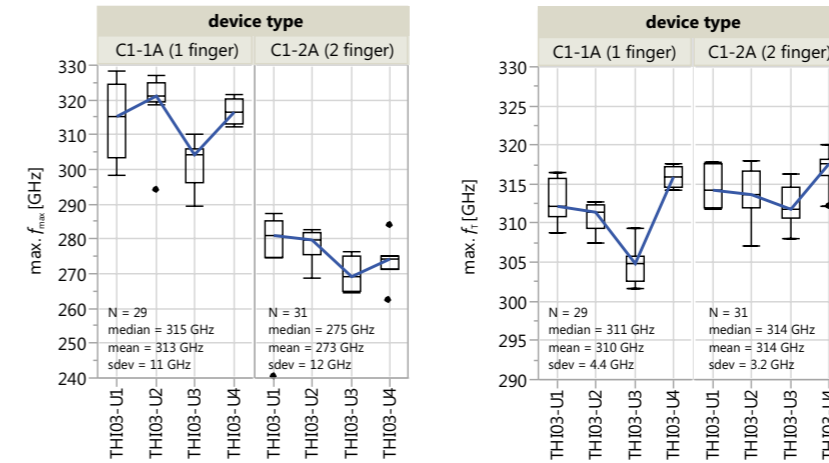


Fig. 3.  $f_t$  and  $f_{max}$  measured on four identically processed 3" wafers with full InP/BiCMOS heterointegration. Data include microstrip and pad parasitics, de-embedding leads to an increase of 50 GHz in  $f_t$  and 10 GHz in  $f_{max}$ .

## Publications

M. Hossain, N. Weimann, M. Lisker, C. Meliani, B. Tillack, V. Krozer, W. Heinrich, "A 330 GHz Hetero-Integrated Source in InP-on-BiCMOS Technology", accepted, IMS (2015).

N. Weimann, K. Nosaeva, S. Monayakul, V. Krozer, O. Krüger, M. Lisker, B. Tillack, "Transferred substrate InP DHBT processes for mm-wave applications", Micro- and Millimetre Wave Technology and Techniques Workshop, 25-27 November 2014, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands (2014).

M. Hossain, N. Weimann, O. Krüger, V. Krozer, W. Heinrich, "A 270 GHz Push-Push Oscillator in InP-DHBT-on-BiCMOS Technology"; Proc. 44<sup>th</sup> European Microwave Conf. (EuMC), Rome, Italy, pp. 588-591 (2014).

M. Lisker, A. Trusch, A. Krüger, M. Fraschke, P. Kulse, S. Marschmeyer, J. Schmidt, C. Meliani, B. Tillack, N. Weimann, T. Krämer, I. Ostermay, O. Krüger, T. Jensen, T. Al-Sawaf, V. Krozer, W. Heinrich, "Combining SiGe BiCMOS and InP Processing in an On-top of Chip Integration Approach", ECS Transactions, 64(6), 177-194 (2014).

T.K. Johansen, M. Rudolph, T. Jensen, T. Krämer, N. Weimann, F. Schnieder, V. Krozer and W. Heinrich, "Small- and large-signal modeling of InP HBTs in transferred-substrate technology"; Int. J. Microwave Wireless Technology, vol. 6, no. 3/4, pp. 243-251 (2014).

I. Ostermay, A. Thies, T. Krämer, W. John, N. Weimann, F.-J. Schmückle, S. Sinha, V. Krozer, W. Heinrich, M. Lisker, B. Tillack, O. Krüger, "Three-dimensional InP-DHBT on SiGe-BiCMOS integration by means of Benzocyclobutene based wafer bonding for MM-wave circuits", Microelectronic Engineering, vol. 125, pp. 38-44 (2014).

M. Lisker, A. Trusch, A. Krüger, M. Fraschke, P. Kulse, Y. Borokhovych, B. Tillack, I. Ostermay, T. Krämer, A. Thies, O. Krüger, F.-J. Schmückle, V. Krozer, and W. Heinrich, "InP-Si BiCMOS Heterointegration Using a Substrate Transfer Process", ECS J. Solid State Sci. Technol., vol. 3 no. 2, P17-P20 (2014).

of pulsed gold electroplating. BCB process parameters were updated, resulting in reduced pinhole formation and hence increased usable wafer area. The capacitor module was modified to avoid electrical shorts in large-area bypass capacitors. A number of changes in the InP DHBT junction definition and contact processing steps led to a very narrow distribution of  $f_t$  and  $f_{max}$  not only within one wafer, but over the entire wafer lot (see Fig. 3). The high predictability of InP active and passive device parameters led to the realization of integrated mm-wave sources with five-fold increased RF output power. It was shown that the BiCMOS devices are virtually unchanged during InP post-processing, enabling the use of pre-existing BiCMOS circuit libraries in the heterointegrated process. The groundwork for the next device generation was laid with the first demonstration of functioning 300 nm wide transferred-substrate InP DHBTs, featuring critical layer definition by electron beam direct writing instead of i-line stepper lithography.

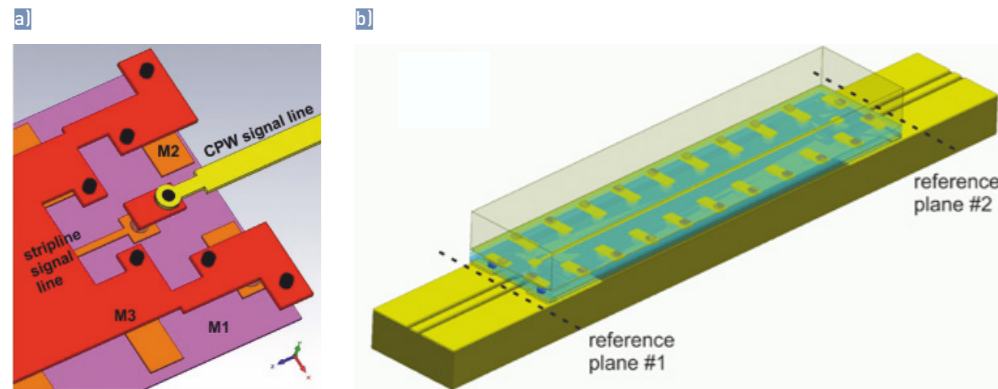
FBH and IHP are now offering their heterointegrated InP DHBT/SiGe BiCMOS semiconductor process in a foundry mode to third party customers in research and industry. A common design kit has been created, enabling seamless integration of both technologies already during the design and layout phase. Recent improvements and the tight coupling of IHP's and FBH's design environments are supported by the current Leibniz/SAW project "SciFab". The joint technology is made available to third parties through IHP's foundry interface (further details see [www.ihp-microelectronics.com/scifab](http://www.ihp-microelectronics.com/scifab)).

Die heterogene Integration von III-V Halbleitermaterialien mit Silizium wird weltweit verstärkt untersucht. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit und das Anwendungsspektrum bestehender Silizium-Integrationsplattformen zu erweitern. Einen entsprechenden Prozess, der Indium-Phosphid (InP)-Doppel-Heterobipolartransistoren (DHBT) mit der Silizium-Germanium-Bipolar-CMOS-Technologie vereint, hat das FBH zusammen mit dem Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik in Frankfurt/Oder (IHP) entwickelt. Verglichen mit Silizium weist das InP-Material eine breitere Bandlücke und höhere Elektronengeschwindigkeit auf. InP bietet daher im DHBT höhere Durchbruchspannung und Grenzfrequenzen selbst bei größeren Bauelementabmessungen. Indem beide Technologien auf Wafer-Ebene zusammengeführt werden, können komplexe mm-Wellen-Schaltkreise mit hoher Ausgangsleistung realisiert werden, siehe auch S. 63. Neben der Demonstration von eigenen mm-Wellen-Schaltkreisen wird diese Technologie von FBH und IHP jetzt auch interessierten Kunden aus Wissenschaft und Industrie im Foundry-Modus angeboten.

[www.ihp-microelectronics.com/scifab](http://www.ihp-microelectronics.com/scifab)

## Flip-chip interconnects for sub-THz applications

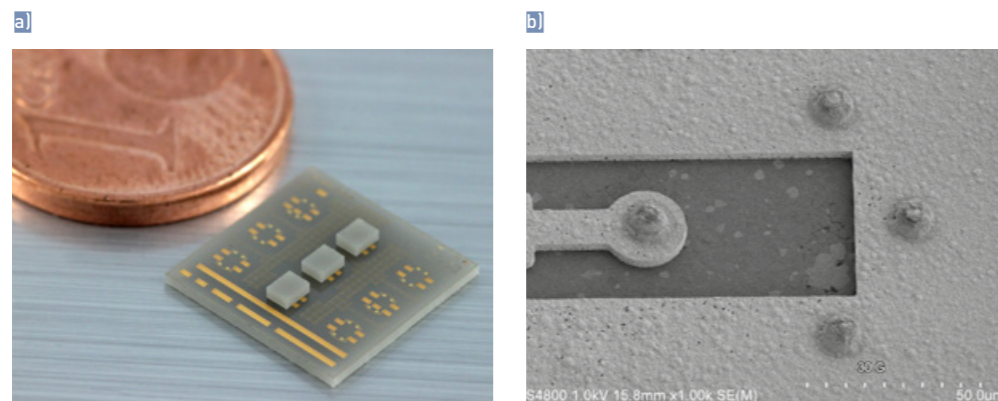
High-frequency electronics are pushing more and more towards the mm-wave and sub-THz bands. Economical packaging and interconnect concepts to support operating frequencies and exhibiting low loss in the mm-wave bands and beyond are sought after. Flip-chip mounting is a very suitable method for sub-THz chip carriers. With flip-chip connections, very short vertical interconnect paths are possible as compared to wire bonding, thus enabling the needed bandwidth. In addition, radiation losses in the chip-to-carrier transition can be efficiently limited by optimized flip-chip bump placement. Low-loss thin-film transmission lines with 50  $\Omega$  impedance can be realized in either gold microstrip or stripline architecture with benzocyclobutene (BCB), a low-k interlayer dielectric. Besides the electrical advantages, flip-chip technology enables mechanically stable multi-chip assemblies, resulting in a smaller package size and reduced system weight. According to full 3D electromagnetic (EM) calculations, bandwidths of up to 500 GHz are attainable with flip-chip connection structures fabricated with a 10  $\mu\text{m}$  design rule.



< Fig. 1. (a) 3D view of flip-chip transition, (b) back-to-back flip-chip test structure.

We have successfully developed a stripline-to-coplanar waveguide (CPW) interconnect employing miniaturized AuSn flip-chip bumps achieving operating frequencies of up to 250 GHz. The designed line systems and RF transitions were developed and optimized with the 3D full-wave EM wave simulator CST Microwave Studio. The exact geometries and properties of the chip's and the carrier substrate's dielectric stack were taken into account. On the chip side, we implemented a fully shielded stripline geometry to minimize radiation loss. On the carrier substrate, single-layer waveguides in CPW topology were chosen for a first demonstration. The CPW lines display increased loss at frequencies above 250 GHz, their replacement with a multilayer stripline design is currently being investigated. Even with a CPW carrier substrate, wideband interconnects up to 250 GHz could be measured. The 3D view of our flip-chip transition can be seen in Fig. 1a.

Semiconductor front-end fabrication methods were applied to realize the interconnect structures on both the chip and the carrier substrate. While the design rule of 10  $\mu\text{m}$  line-and-space is fairly relaxed, the correct lateral placement of the RF conductor's edge within



< Fig. 2. (a) Fabricated module with 3 AlN chips bonded on AlN substrate, (b) top view of the fabricated AuSn bumps on Au-plated CPW.

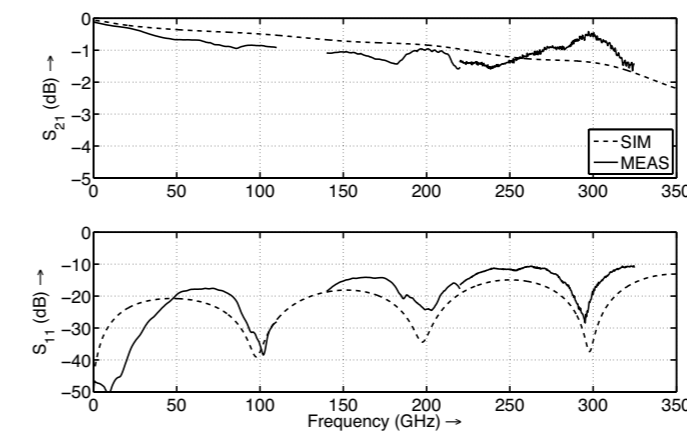
$\pm 1 \mu\text{m}$  is crucial to maintain the proper line characteristics and to minimize reflections due to impedance mismatch. Stripline and CPW waveguides were defined on 3-inch aluminum nitride (AlN) wafers by i-line stepper lithography and fabricated in a gold electroplating technology. On the chip side, vertical connections between upper and lower ground plane and between the signal trace and the bump landing pad were realized with gold-filled via holes.

On the single-layer submount CPW lines, which consisted of electroplated Au, 6  $\mu\text{m}$  high AuSn microbumps with a diameter of 10  $\mu\text{m}$  were patterned using a metal lift-off technique (Fig. 2b). To suppress unwanted diffusion between the AuSn bumps and the electroplated Au a thin Ti/Pt/Au barrier was deposited on top of the CPW. The AuSn microbumps themselves consisted of an evaporated metal stack later forming the  $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$  eutectic.

Using conventional dicing technology the wafers were cut into pieces of desired size. The chips were then placed onto the submount by a semiautomatic flip-chip aligner FC-150 with  $\pm 1 \mu\text{m}$  lateral alignment accuracy, within the design margin of  $\pm 2 \mu\text{m}$ . In the flip-chip bonding process, the chips and the substrates are briefly heated to above 300°C under forming gas atmosphere, leading to the alloying of the AuSn microbumps into the substrate's Au contacts. Hence, an electrical and mechanical connection between the chip and the substrate is formed.

S-parameters were measured on flip-chip test structures as shown in Fig. 1b using a vector-network analyzer (VNA) with coplanar wafer probes. Small-signal RF measurements of back-to-back flip-chip transitions showed an insertion loss below 1.0 dB per interconnect and a return loss of more than 10 dB from DC up to 250 GHz. The measurement results indicate a good agreement with the simulated results from 3D EM calculations. These figures are so far the best reported for flip-chip mounts in this frequency range.

This work was done in the frame of the BMBF research project "AVTE" (reference No.16V0060).



< Fig. 3. Transmission (top) and reflection coefficient (bottom) of a back-to-back test structure as a function of frequency: measurement (solid) and 3D EM simulation data (dashed).

Das FBH hat einen Flip-Chip-Aufbau entwickelt, der eine -1 dB Bandbreite von 250 GHz aufweist. Den HF-Wellenleiter auf der Chipseite haben wir dabei als Streifenleiter mit einer 10  $\mu\text{m}$  breiten Gold (Au)-Signalleitung realisiert, die zwischen oberer und unterer Au-HF-Masseebene in Benzocyclobuten (BCB) eingebettet wurde. BCB zeigt eine geringe Dielektrizitätskonstante von 2,65, einen niedrigen Verlustwinkel ( $< 10^{-3}$ ) und ist kompatibel zur am FBH genutzten InP-HBT-Technologie. Auf dem Aluminiumnitrid-Trägersubstrat wurden koplanare Wellenleiter hergestellt. Die 6  $\mu\text{m}$  dicken Microbumps mit 10  $\mu\text{m}$  Durchmesser besitzen eine summarische Zusammensetzung von  $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ . Mithilfe eines halbautomatischen Flip-Chip-Bonders wurden die Chips innerhalb der vorgesehenen Toleranz von  $\pm 2 \mu\text{m}$  auf das Trägersubstrat montiert und die Microbumps oberhalb von 300°C einlegiert. Kleinsignal-HF-Messungen zeigen eine Einfügedämpfung von  $< 1 \text{ dB}$  pro Verbindung und Reflexionen unter -10 dB im gesamten Frequenzband von DC bis zu 250 GHz. Damit erreichen diese Flip-Chip-Aufbauten die bislang besten Werte in diesem Frequenzbereich.

### Publication

S. Monayakul, S. Sinha, C. -T. Wang, N. Weimann, F. J. Schmückle, M. Hrobak, V. Krozer, W. John, L. Weixelbaum, P. Wolter, O. Krüger, W. Heinrich, "Flip-chip Interconnects for 250 GHz Modules", IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., vol. 25, no. 6, pp. 358-360 (2015).

## Diamond heat spreading layer integration with InP sub-THz transistors

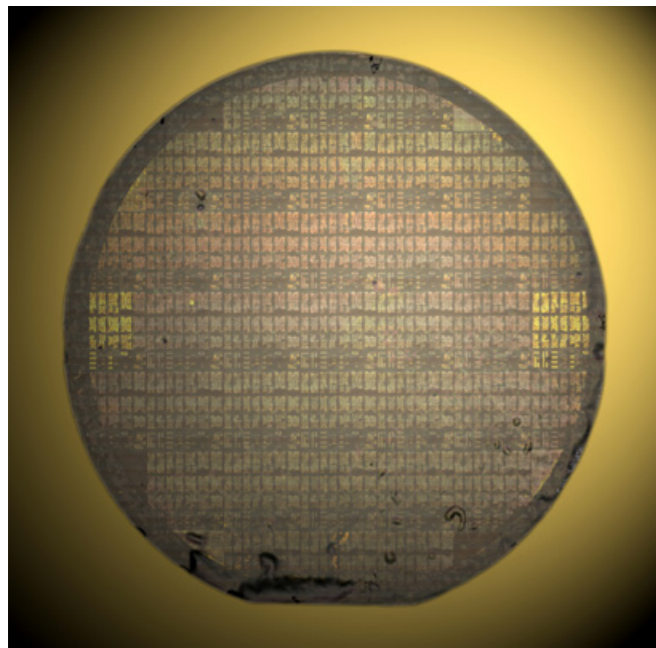


Fig. 1. InP HBT with diamond heat spreading layer on 3" AlN wafer.

Diamonds are a girl's best friend, as is widely known, but it turns out not only the girl's! Perfect ability to conduct heat (with a thermal conductivity of up to  $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) makes diamond one of the best candidates for spreading the heat from electronic devices during operation. Studies have shown that, when it comes to the reliability of packaged chips, more than half of all failure processes exhibit a temperature-dependent behavior. During the testing of DC power limits it was found that FBH's indium phosphide double heterobipolar transistors (InP DHBTs, see 3" wafer in Fig. 1), which are processed in a transferred-substrate technology, show thermal effects when the applied current density exceeds  $4.5 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ .

FBH's InP DHBT integration is based on benzocyclobutene (BCB) for adhesive wafer bonding and interlevel passivation, which exhibits only a low thermal conductivity of  $0.29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  compared to the host substrate material AlN with  $170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , the interconnect metal gold with  $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , and the semiconductor material InP with  $68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Therefore, BCB may considerably impede the heat flow, even if the thickness of the bonding layer is less than  $5 \mu\text{m}$ .

Improvements in heat spreading can be described by considering the absolute thermal resistance of the transistor  $R_{\text{th}}$ , which not only limits the RF output power of the device, but also reduces the small signal gain through self-heating of the device. A lower  $R_{\text{th}}$  indicates improved heat removal from the device. Thermal simulations showed that a  $10 \mu\text{m}$  thick diamond layer with a thermal conductivity greater than  $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  on top of the HBT layer stack leads to a decrease of the thermal resistance by a factor of two.

Diamond layers formed by chemical vapor deposition are commercially available on 3" silicon handle substrates. After completion of the active and passive InP MMIC layers the diamond layer is transferred from the silicon handle to the InP-on-AlN MMIC layer stack in a BCB-based wafer bonding process (Fig. 2a). Then, the silicon handle wafer is removed in a combined mechanical grinding and wet chemical release process. Because of BCB's poor thermal conductivity, heat transfer from the active HBT device is established by a thermo-via

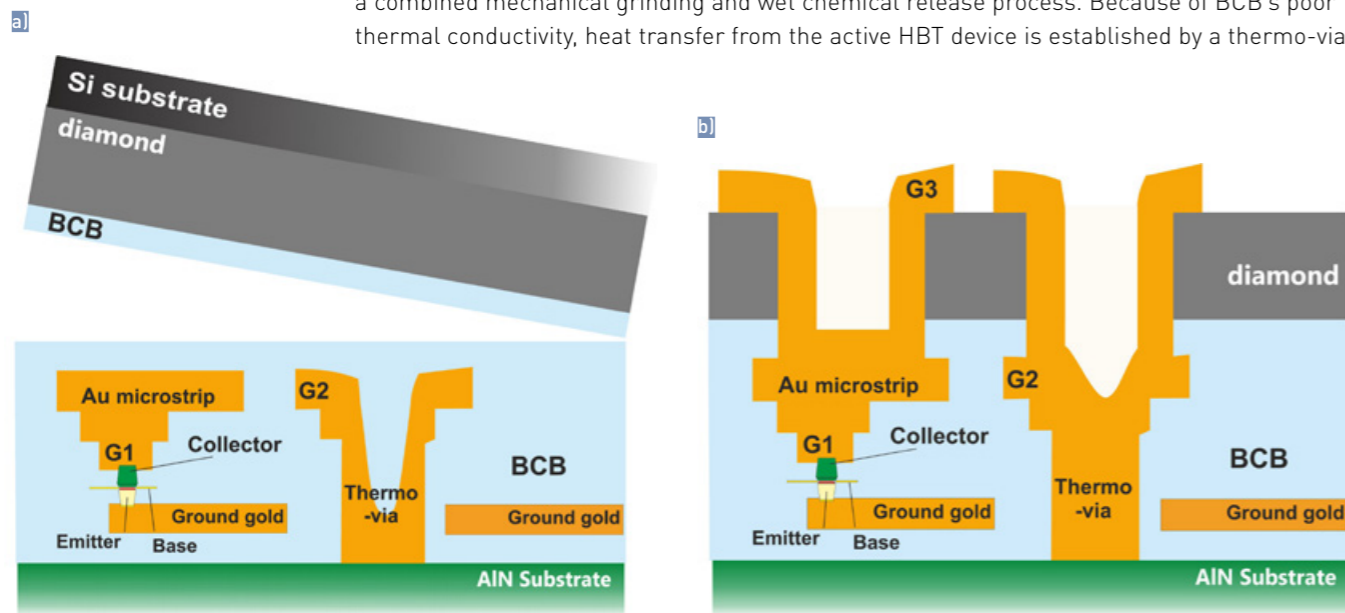


Fig. 2. Schematic representation of the diamond transfer using an adhesive bonding process (a) and of the finalized structure (b) including heat bridges (thermal vias).

formed in a through-diamond via process and subsequent via filling with electroplated gold. The thermo via connects the "hot" device terminal thermally to the diamond heat spreading layer (Fig. 2b). Since diamond possesses a very low loss tangent ( $< 10^{-5}$ ), the collector, which is "hot" in both a thermal and RF electrical sense, may be connected by a vertical metal stub ending on top of the diamond layer without affecting the RF characteristics of the HBT.

InP DHBTs were characterized by DC and RF measurements on the same wafer before and after diamond layer integration. A significant reduction of the hysteresis in DC output curves caused by self-heating could be observed with the diamond heat sink (see Fig. 3).

RF small-signal measurements showed no significant reduction in performance. The difference in current gain cutoff frequency  $f_T$ , 358 GHz before and 321 GHz after diamond integration, and the difference in maximum oscillation frequency  $f_{\text{max}}$ , 329 GHz before and 321 GHz after diamond layer bonding, are within the measurement accuracy.

First extractions of  $R_{\text{th}}$  have been made with a DC method using the HBT's base-emitter junction as a thermometer inside the device under test, without and with transferred diamond layer. Output IV curves were measured at base plate temperatures between  $30^\circ\text{C}$  and  $50^\circ\text{C}$ . For each measured point in the forward active region, a value for  $R_{\text{th}}$  was deter-

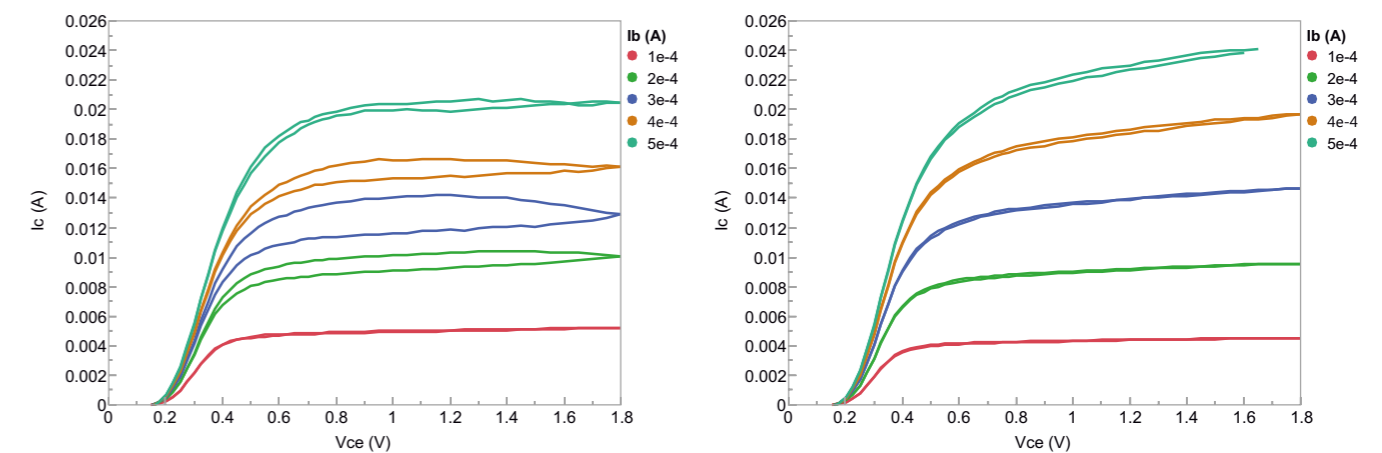


Fig. 3. DC output curves of one-finger HBT ( $0.8 \times 5 \mu\text{m}^2$  emitter area) before (l.) and after diamond transfer (r.).

mined using our modified Bovolon's method which minimizes extraction uncertainty. More than 250  $R_{\text{th}}$  values were extracted for dissipated powers ranging from 21 mW to 39 mW. With the diamond layer we observed a more than twofold reduction of the absolute thermal resistance (from  $2.9 \text{ K}\cdot\text{mW}^{-1}$  to  $1.2 \text{ K}\cdot\text{mW}^{-1}$ ) for one-finger HBTs with  $0.8 \times 5 \mu\text{m}^2$  emitter area, as had been predicted in 3D thermal simulations. To our knowledge, this is the lowest value reported for InP HBTs of this size enabling enhanced power handling capability of the current InP device generation.

This work was done in the frame of the BMBF research project "AVTE" (reference No.16V0060).

### Publications

K. Nosaeva, N. Weimann, M. Rudolph, W. John, O. Krüger, W. Heinrich, "Improved thermal management of InP transistors in transferred-substrate technology with diamond heat-spreading layer", *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 13, pp. 1010-1012 (2015).

K. Nosaeva, W. John, N. Weimann, O. Krüger, T. Krämer, "Development of a Via Etch Process through Diamond and BCB for an Advanced Transferred-Substrate InP HBT Process", 37<sup>th</sup> Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE), Warnemünde, Germany, May 26-29, ISBN 978-3-00-041435-0, pp. 23-24, (2013).

Das FBH hat einen InP-HBT-Prozess entwickelt, bei dem die aktiven Halbleiterschichten auf einen keramischen Aluminium-Nitrid (AlN)-Träger im Waferbondverfahren aufgebracht werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Trägers liegt bei mehr als  $170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Als Klebematerial wird Benzocyclobuten (BCB) verwendet, ein Polymer, das jedoch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist ( $0,29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Um den Wärmeabfluss im HBT zu verbessern, verwenden wir eine  $10 \mu\text{m}$  dicke nanokristalline CVD-Diamantschicht (NCD) mit einer Wärmeleitfähigkeit um  $600 - 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  auf der Kollektorseite des Transistors. Die NCD-Wärmespreizschicht selbst wird über thermische Vias zum AlN-Substrat angebunden, das die Wärmesenke darstellt. Im Einklang mit 3D-Simulationen des Wärmeflusses sinkt der Wärmewiderstand mit der integrierten Diamantschicht signifikant von durchschnittlich  $2,9 \text{ K}\cdot\text{mW}^{-1}$  auf  $1,2 \text{ K}\cdot\text{mW}^{-1}$ .

## Process optimization for through-substrate vias in SiC

Highly efficient high-power transistors based on AlGaN/GaN hetero-junction field effect transistors (HFETs) offer novel solutions for high-class applications, e.g., in radar and communication systems. The corresponding AlGaN/GaN epitaxial layers are grown on silicon carbide (SiC), a substrate material that is mechanically and chemically very resistive and requires sophisticated processing concepts.

An elegant way to overcome the limitations of wire bonding technology is paved by introducing through-substrate vias (TSV). Such vias create an electrical connection to one of the transistor contacts, e.g., the source pad, from the wafer front to its back. TSVs help to reduce the electrical load, minimize losses, obtain a better power efficiency, optimize heat dissipation, and simultaneously reduce mounting costs. However, this design evokes the challenge to process TSVs into the highly resistant SiC substrate.

The FBH is continuously optimizing its TSV process module for 4-inch GaN on SiC wafers that is performed after completing transistor processing. Here, the wafers are cladded on the front with a bonding material and temporarily bonded to a carrier wafer. This creates a wafer-carrier bond which is mechanically robust enough to allow the thinning of the wafer to its target thickness of about 100  $\mu\text{m}$ . The mismatch of the coefficients of thermal expansion of the substrate and the carrier wafer leads to an undesired bow of the wafer-carrier system. By using lift-off technique, the layered etch mask consisting of aluminum and indium tin oxide is patterned.

The etch process is accomplished in two steps. First, SiC etching is performed in an ICP single wafer etch chamber with a  $\text{SF}_6/\text{He}$  gas mixture. This process stops at the SiC/GaN interface. A following chlorine-based etch step removes the gallium nitride and opens the metal layers of the front pad.

The wafer-carrier bond faces challenging conditions during the two ICP etch processes. To reach reasonable etch rates, especially for SiC, the platen temperature should be as high as possible. This creates severe mechanical stress on the bond due to the mismatch of the thermal expansion coefficients of wafer and carrier. This thermal stress is increased by additional heat transfer resulting from the plasma etch process. To avoid excessive temperatures that deteriorate the bond joint, cooling of the back is required. This cooling process reduces the heat load and hence thermal stress, but adds a certain amount mechanical stress. The "sweet spot" of high etch rate, good etch uniformity, high etch selectivity, and low mechanical stress is difficult to find in the etch tool. During the etch process in the tool, the mechanical stress on the wafer cannot be determined.

FBH and Laytec have succeeded in building an in-situ online sensor that allows to determine the actual center bow of the wafer-carrier bond in the etch chamber already during the etch process. This bow is measured by deflection of a laser beam reflected from the wafer surface. The sensor is mounted externally on top of the etch chamber and does not interfere with the etch process (Fig. 1). For the first time, the influence of backside pressure, temperature, and plasma parameters on the wafer bow could be analyzed directly in the etch chamber.

Fig. 2 shows the effect of the cooling gas pressure on the center bow of a wafer. The initial wafer bow in the etch chamber when fixed in its carrier is already about 60  $\mu\text{m}$ . Switching on the cooling gas increases this bow linearly with the gas pressure. Hence, the major impact of the bow comes from the cooling gas. By optimizing carrier and gas

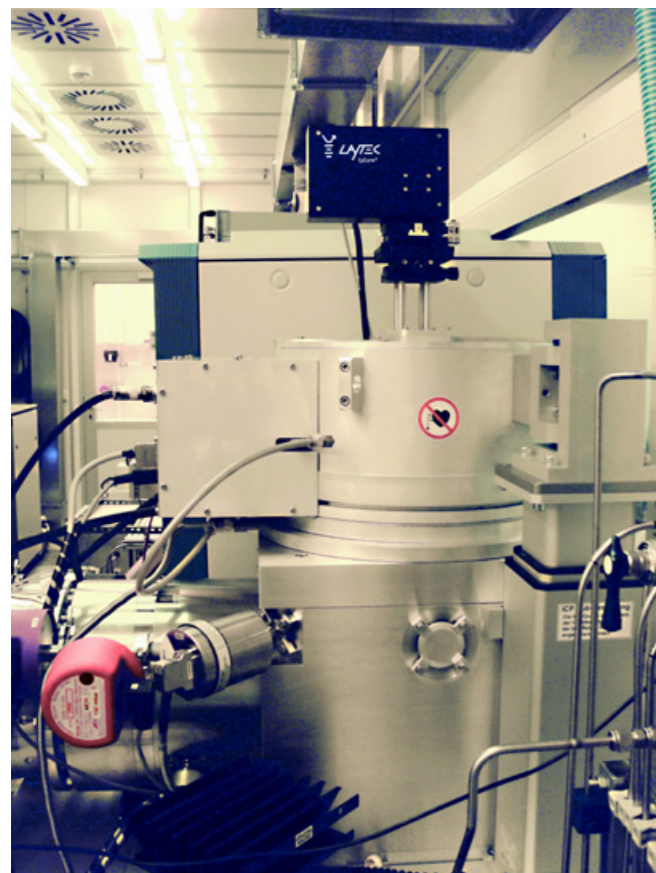


Fig. 1. FBH etch tool with new bow measurement sensor.

flow along with fine tuning the etch parameters a less stressing process was developed. The in-situ results for this process are plotted in Fig. 3. Wafer bow starts with a small value of about -15  $\mu\text{m}$ . During heating to the etch temperature of 100°C, the bow first increases by 40  $\mu\text{m}$ . Then, relaxation starts. Switching-on the plasma creates additional stress to the wafer-carrier bond. During the etch process, a pronounced development is observed, but the system does not fail mechanically.

This allowed us to find a new set of parameters leading to an optimized etch process with less mechanical stress and increased yield. After the SiC etch step had been completed, the remaining etch mask was stripped in a wet chemical step. This step also cleans the vias themselves from any residues of the SiC etch process and prepares the following GaN etch step. After deposition of a plating base consisting of a titanium gold layer, 5  $\mu\text{m}$  of gold was electroplated. Typical resistance values of ~ 10–20 m $\Omega$  per single via were obtained.

In conclusion, the overall process sequence for the formation of TSVs in SiC was carefully optimized. Due to in-situ monitoring of the stress on the wafer-bond-carrier by developing an online bow sensor, we were able to improve the etch processes and to enhance the yield of the overall process. These achievements help us to further advance FBH's highly efficient high-power transistors for microwave devices.

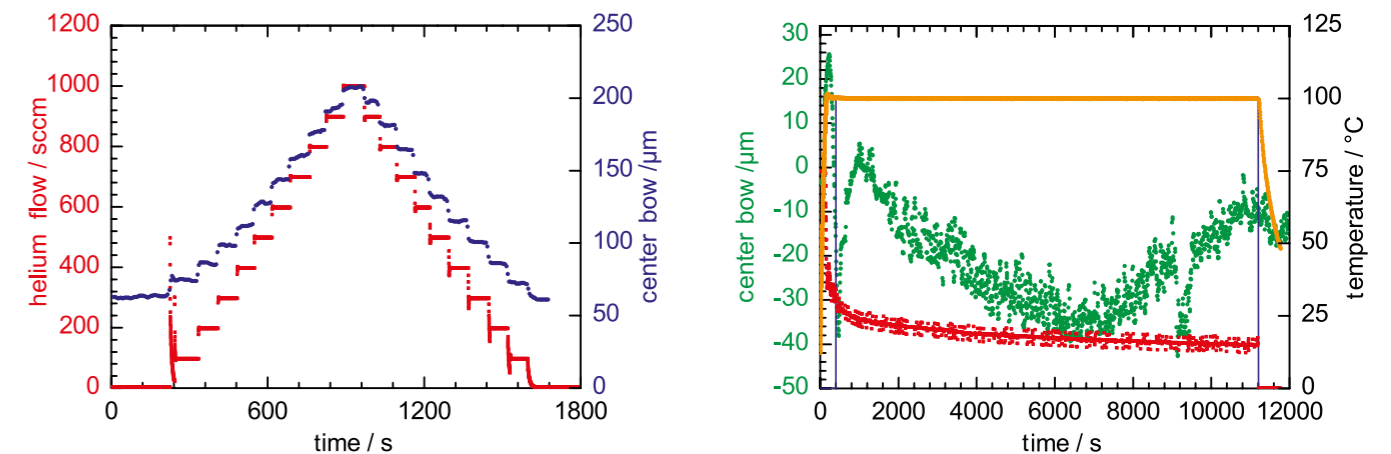


Fig. 2. Impact of helium back-side pressure (red) on the center bow (blue).

Fig. 3. Center bow (green), heating power (red), and plasma power (orange) of the optimized SiC etch process.

Das Prozessmodul zur Herstellung von Durchgangskontakten auf 4" GaN-auf-SiC-Wafern wurde im vergangenen Jahr weiterentwickelt. In diesem Modul werden auf Stützwafer aufgeklebte Siliziumkarbid (SiC)-Wafer auf 100  $\mu\text{m}$  Dicke abgedünnt. Anschließend werden mithilfe eines Plasmaätzprozesses Kontaktlöcher mit 30 x 80  $\mu\text{m}^2$  Durchmesser geformt, die in einem weiteren Schritt mit einer 5  $\mu\text{m}$  starken Goldschicht ausgekleidet werden. Der Plasmaätzschritt des harten und chemisch widerstandsfähigen Materials SiC stellt hohe Anforderungen an den Wafer-Stützwafer-Verbund. So kommt es während des Prozesses häufig zu unerwünschten Verbiegungen des Wafers. Mithilfe eines Sensors, der in Kooperation mit Laytec entwickelt wurde, ist es nun erstmals gelungen, die Verbiegung des Wafers noch im Ätzreaktor zu messen. Dadurch konnten der Einfluss des Trägers, des Kühlgasflusses und der Plasmaätzparameter unabhängig voneinander bestimmt werden. Mit diesen Daten konnte der Ätzprozess am FBH so weiterentwickelt werden, dass der empfindliche Verbund weniger belastet, Ausbeute sowie Homogenität erhöht und die Prozesszeit verringert werden konnte.

### Publication

A. Thies, W. John, S. Freyer, J. Beltran, O. Krüger, "Analysis and Optimization of a Through Substrate Via Etch Process for Silicon Carbide Substrates", Digest of Papers, International Conference on Semiconductors, Scottsdale, Arizona (2015).



For further information:



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

## Impressum *Imprint*

**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](mailto:fbh@fbh-berlin.de)  
 Web [www.fbh-berlin.de](http://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 2015

**Editors *Redaktion***  
 Gisela Gurr, Petra Immerz

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

**Printing *Druck***  
 ....

## Images & Graphics *Fotos & Grafiken*

K. Bilo p. 2  
 P. Immerz: pp. 9, 14, 21, 28, 30, 34, 35, 37, 46, 54, 56, 84, 120 bottom (l.), 122  
 B. Schurian: pp. 10, 11, 12, 13, 24, 26, 29, 32, 33, 55, 72 top, 76 top, 98 top, 99, 118 top  
 IGZ: p. 23  
 ESA ATG medialab: p. 31  
 GenaU (Rasche): pp. 40, 41  
 M. Schönenberger: p. 44  
 Laserverbund Berlin- Brandenburg: p. 45  
 ICFO Barcelona: p. 52  
 TU Berlin: p. 79 (r.)  
 LayTec: p. 124  
 further / weitere: FBH



Leibniz  
**Ferdinand  
Braun  
Institut**

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

[www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)