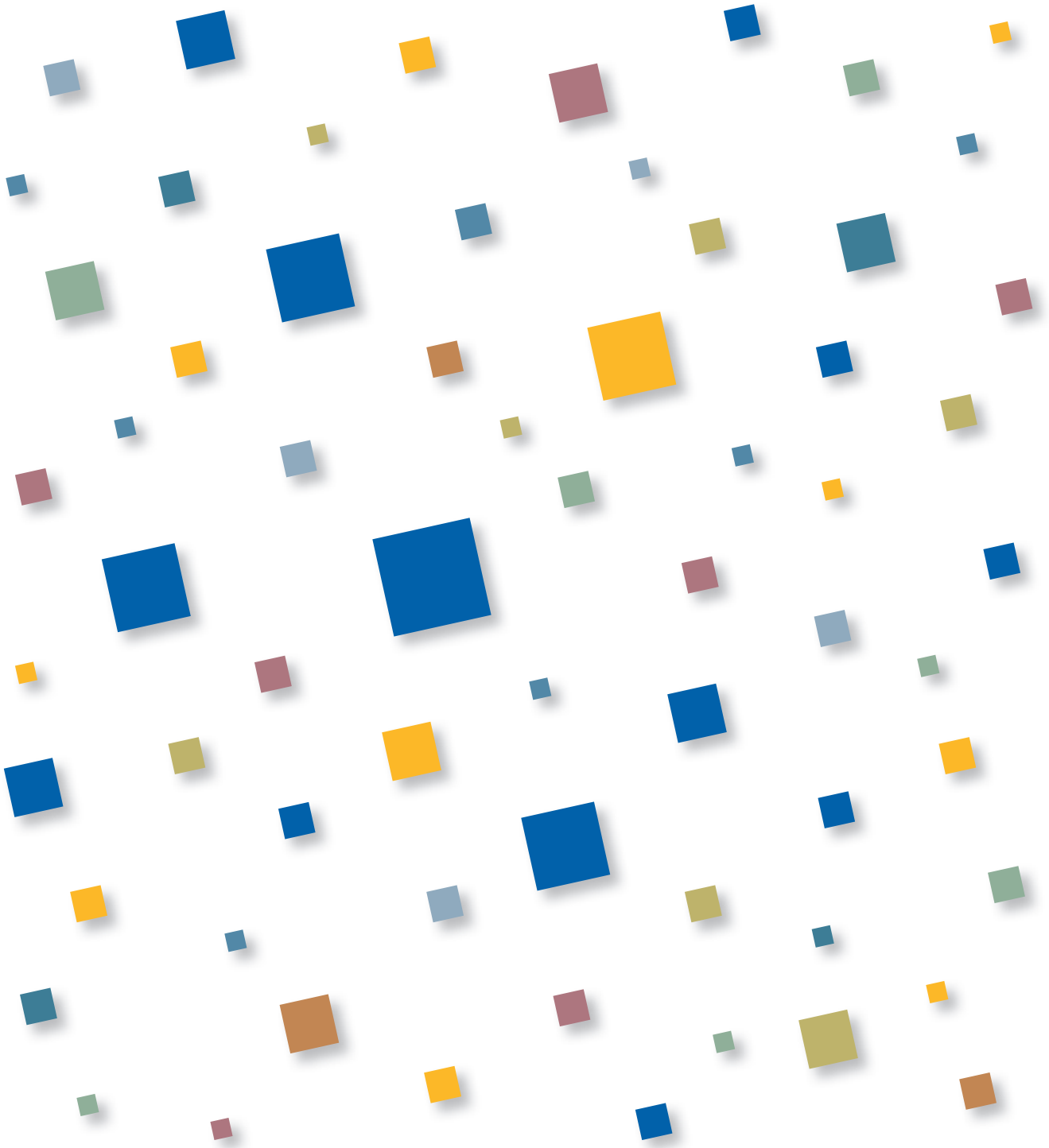




Leibniz  
Ferdinand-Braun-Institut



ANNUAL REPORT | JAHRESBERICHT

2012

## ... TRANSLATING IDEAS INTO INNOVATION

Dieser Claim fasst die Mission unseres Institutes prägnant zusammen. Seit mehr als 20 Jahren steht das Ferdinand-Braun-Institut für die Erforschung von Schlüsseltechnologien in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik – mit Forschungsergebnissen auf internationalem Spitzenniveau. In Zusammenarbeit mit Partnern in Forschung und Industrie setzen wir Ergebnisse in praktische Anwendungen um. Innovative Produktideen transferieren wir erfolgreich durch Spin-offs. Unsere Lösungen, die exakt auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten sind, bieten wir aus einer Hand: vom Entwurf bis zum lieferfähigen Modul. Diese Werte lassen sich noch um unser Streben nach Nachhaltigkeit erweitern. Entsprechend reichen unsere Aktivitäten von der grundlagen- bis zur anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung und dem anschließenden Transfer zu Partnern aus Industrie und Forschung. Sie nutzen unsere Ergebnisse und verwerten sie – als Basis für weitere Erkenntnisse oder für den kommerziellen Erfolg, ganz im Sinne unseres Forschungsauftrags.

2012 belegen dies erneut zahlreiche Beispiele aus Forschung und Entwicklung: Von den erfolgreichen Joint Labs mit Universitäten in Berlin und Frankfurt, bis hin zu einer Vielzahl von Kooperationen mit Unternehmen vor Ort und weltweit. So entwickeln wir im Rahmen der Kooperation mit der Humboldt-Universität zu Berlin beispielsweise im Grundlagenprojekt AdMiRe optische Mikroresonatoren für Präzisionsanwendungen. Das integrierte Team schafft dabei die Voraussetzungen für den Einsatz der neuartigen, hochinnovativen Technologie und für deren Kommerzialisierung.

Im industriellen Bereich sind wir für viele unserer Partner unverzichtbarer Bestandteil der Wertschöpfungskette. Aus der Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung entstehen innovative Produkte, mit denen sich insbesondere kleine und mittlere Unternehmen erfolgreich am Markt behaupten – oft in Nischenmärkten und nicht selten in marktführender Position. Sichtbare Anerkennung der Aktivitäten im Bereich Technologietransfer ist der im März 2012 an ein sechsköpfiges FBH-Team verliehene Transferpreis WissensWerte. Die Auszeichnung wurde für besonders leistungsfähige Diodenlaser vergeben, die in der Materialbearbeitung genutzt werden. Damit ehrt der Preis zugleich die langjährige und fruchtbare Zusammenarbeit mit der JENOPTIK-Gruppe, aus der auch eines der insgesamt fünf Spin-offs des FBH hervorgegangen ist.

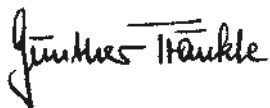
International ist das Ferdinand-Braun-Institut im Rahmen mehrerer großer EU-Projekte, internationaler Forschungsverbünde und Industriekooperationen sehr gut aufgestellt. Wir konnten diese weltweiten Aktivitäten im vergangenen Jahr insbesondere im asiatischen und amerikanischen Raum erfolgreich ausbauen.

Basis dafür sind State-of-the-Art Entwicklungen aus dem FBH. Diese wären nicht möglich ohne die exzellente technische Ausstattung und Infrastruktur am Ferdinand-Braun-Institut, die in den vergangenen Jahren umfassend erneuert wurde. Mit Unterstützung unserer Zuwendungsgeber stehen dem FBH dadurch hervorragende Bedingungen für Forschung und Entwicklung zur Verfügung. Unser Dank gilt daher unseren Geldgebern im Land Berlin, im Bund und in der Europäischen Union für die großzügige Förderung.

Auch unseren Partnern und Kunden danke ich sehr herzlich für die vertrauensvolle und vielfach langjährige Zusammenarbeit. Ich freue mich auf viele weitere spannende Projekte. Mein Dank gilt auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Ferdinand-Braun-Instituts, ohne deren Engagement, Erfahrungen und Kenntnisse unsere exzellenten Ergebnisse nicht möglich wären.

Ich freue mich auf die weiterhin gute Zusammenarbeit mit Ihnen allen. Eine anregende Lektüre der Entwicklungen und Ereignisse des vergangenen Jahres wünscht Ihnen,

Ihr



Günther Tränkle

## ... TRANSLATING IDEAS INTO INNOVATION

This claim perfectly condenses the mission of our institute. Since more than 20 years, the Ferdinand-Braun-Institut stands for research of key technologies in microwaves and optoelectronics—leading to world-class research results. In close cooperation with partners in research and industry, we turn our results into practical applications. Additionally, we transfer innovative products successfully by means of spin-offs. Our solutions are tailored precisely to fit the specific requirements of each application, offered by FBH as a one-stop-agency—from design to ready-to-ship modules. These values can be extended by our efforts to achieve sustainability. Accordingly, our activities range from basic to application-oriented research and development with subsequent technology transfer to partners in industry and the scientific community. They use and exploit our results—as a basis to gain further knowledge as well as for achieving commercial success, which perfectly corresponds to our research assignment.

In 2012, once again extensive R&D examples provide evidence of this approach, ranging from the successful joint labs with universities in Berlin and Frankfurt to the great variety of collaborations established with companies situated both locally and world-wide. In the frame of the cooperation with the Humboldt-Universität zu Berlin, for example, optical micro resonators for high-precision applications are under development in the basic research project AdMiRe. With that, the integrated team lays the foundations to make use of the novel, highly innovative technology and its subsequent commercialization.

Regarding the industrial sector, we are an indispensable part of the value chain for many of our partners. Cooperation in research and development leads to innovative products, enabling especially small- and medium-sized companies to act commercially successful—many of these firms are specialized in niche markets and quite often occupy market-leading positions. Most recently, the transfer prize Wissenswerte, awarded to a six-headed FBH team, has been the visible recognition of our technology transfer activities. The award was assigned for particularly powerful diode laser used in materials processing. This way, it also honors the long-term and fruitful cooperation with the JENOPTIK group, which is the hatchery of one of the altogether five FBH spin-offs in addition.

Also internationally, the Ferdinand-Braun-Institut is well positioned within the frame of several major EU projects, international joint research networks, and industry collaborations. We were able to successfully extend our world-wide activities, especially in Asia and the United States.

The basis for this progress are state-of-the-art developments from the FBH. They would not be possible without the institute's excellent technical equipment and infrastructure, which has been comprehensively updated in recent years. As a result, the Ferdinand-Braun-Institut possesses excellent conditions for R&D. I would therefore like to thank our funding federal and state authorities as well as the European Union for generous financial support.

I also like to express my appreciation to our partners and customers for the confident and often long-term cooperation. I am pleased to accomplish many further joint projects and challenges in the future. My thanks also go to the employees of the Ferdinand-Braun-Institut—our excellent results would be impossible without their dedicated involvement, experience, and know-how.

I am looking forward to the further prosperous cooperation with all of you and wish you an inspiring reading of last year's developments and events.

Yours sincerely



Günther Tränkle



# TABLE OF CONTENTS | INHALTSVERZEICHNIS

8

## PROFILE PROFIL

20

## HIGHLIGHTS SCHLAGLICHTER

50

## MICROWAVE COMPONENTS & SYSTEMS MIKROWELLENKOMponentEN & -SYSTEME

52

Compact & flexible RF power amplifier modules for the next-generation mobile communication infrastructure

54

Discrete tunable pre-matching GaN-BST transistors

56

Millimeter-wave circuits using a novel InP-HBT-on-SiGe-BiCMOS technology

58

Compact high-current laser-pulse sources with high efficiency

62

## GAN ELECTRONICS GAN-ELEKTRONIK

64

Designing reliability into GaN devices: development of highly reliable gate technology

66

Fabrication of slanted gates for AlGaIn/GaN HEMTs

68

Reduced dynamic on-state resistance of power GaN FETs due to buffer engineering

70

Improved high voltage properties by pre-epi substrate implantation

74

## DIODE LASERS DIODENLASER

76

Newly optimized power amplifiers enable highly brilliant semiconductor light sources

78

Diode laser bars reach 1.7 kW at -50 °C

80

High-peak power optical ps-pulse sources based on monolithic master-oscillator power amplifiers

82

DBR lasers emitting at 633 nm as an alternative for HeNe lasers in metrology

84

Dual-wavelength diode lasers at 671 nm for Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy

86

Compact and robust diode laser modules for space applications

90

## GAN OPTOELECTRONICS GAN-OPTOELEKTRONIK

92

Custom UV LED modules for water purification and flow cytometry

94

High-power flip-chip UV-B LEDs emitting near 300 nm

98

## MATERIALS & PROCESSES MATERIALIEN & PROZESSE

100

High responsivity UV-C AlGaIn photodetectors on patterned sapphire substrates

102

Hydride vapor phase epitaxy of thick  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers

104

Epitaxial optimization of AlGaInP laser diodes at 633 nm

106

Growth of AlGaIn on defect-reduced AlN ELO templates for UV LEDs

108

Integration of SiGe BiCMOS and InP HBT technology on wafer level

110

Microresonators for applications in optical signal processing and sensing

112

Processing and thermal management of terahertz quantum-cascade lasers

114

Highly reliable silicon carbide photodetectors

118

## SCIENCE MANAGEMENT WISSENSCHAFTSMANAGEMENT

120

Creating value from know-how, research results, and intellectual property

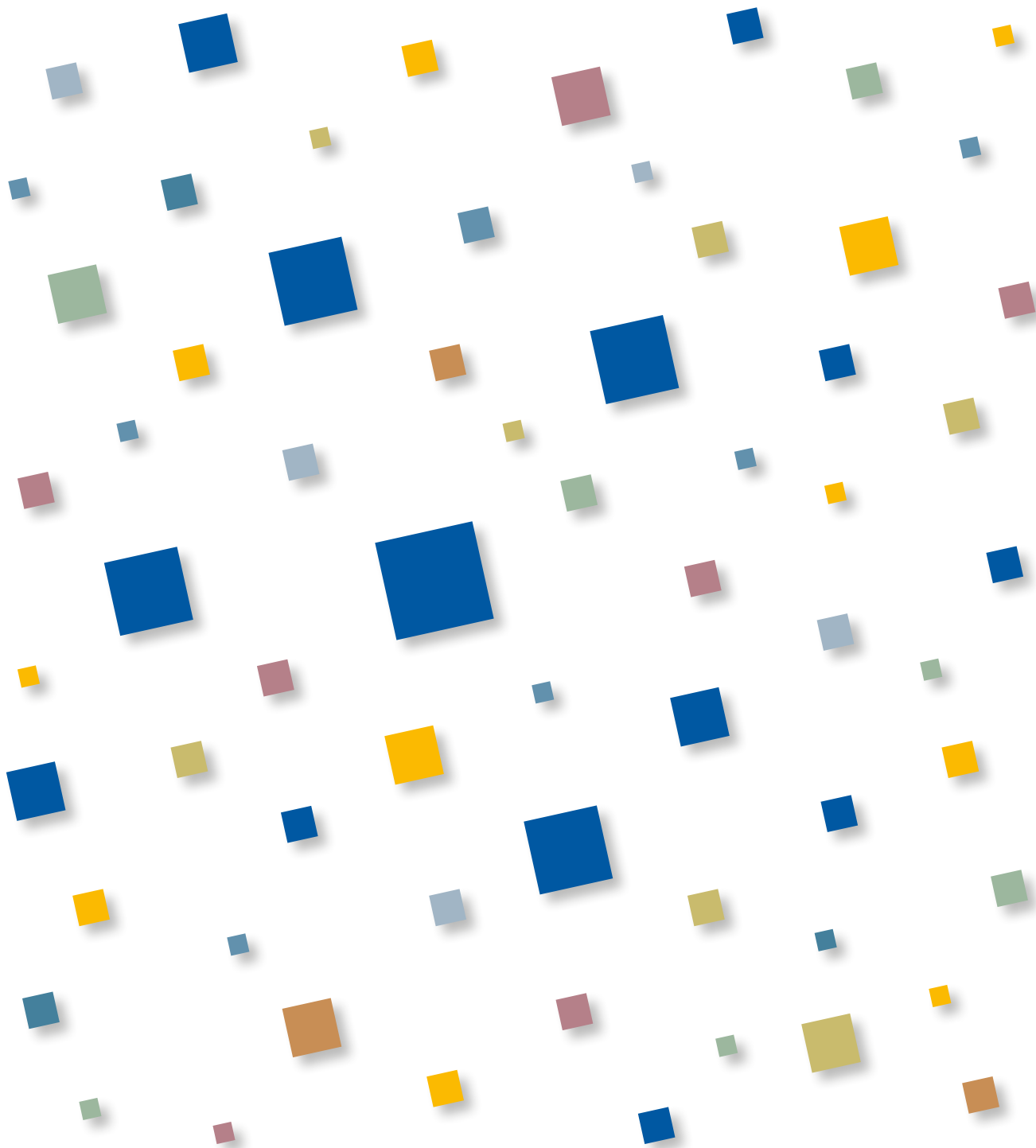
122

Fit for the future: training & education for skilled personnel



# PROFILE

## PROFIL



## 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 Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme 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.





## FBH AT A GLANCE



The Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut fuer Hoehstfrequenztechnik (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.

# LEITBILD

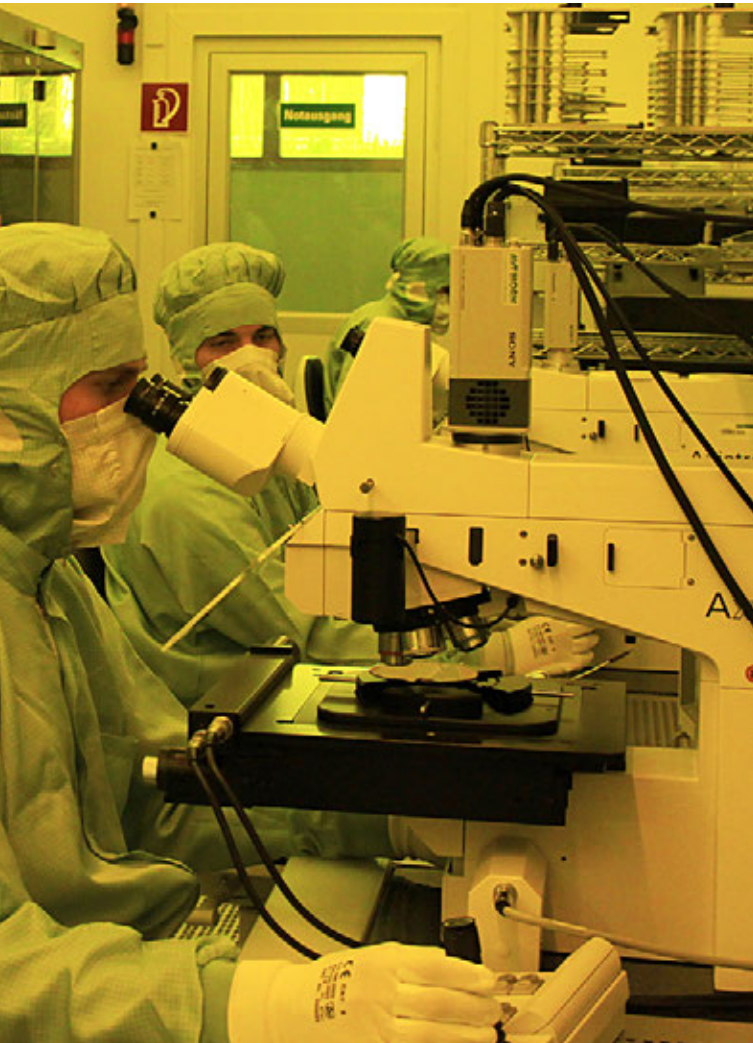
## ... TRANSLATING IDEAS INTO INNOVATION

- 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 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.



# MISSION STATEMENT

## ... TRANSLATING IDEAS INTO INNOVATION



- We explore cutting-edge technologies for innovative applications in the fields of microwaves and optoelectronics. As a center of competence for III-V compound semiconductors, we are part of a worldwide network and achieve research results advancing the international state-of-the-art.
- We offer complete solutions as a one-stop agency—from design to ready-to-ship modules.
- 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.

# 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 (Spektralbereich 0,6–1,2  $\mu\text{m}$ )
- Hochbrillante Laser (Linienbreiten < 10 MHz)
- Hybride Lasersysteme
- 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

# 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 und -systeme

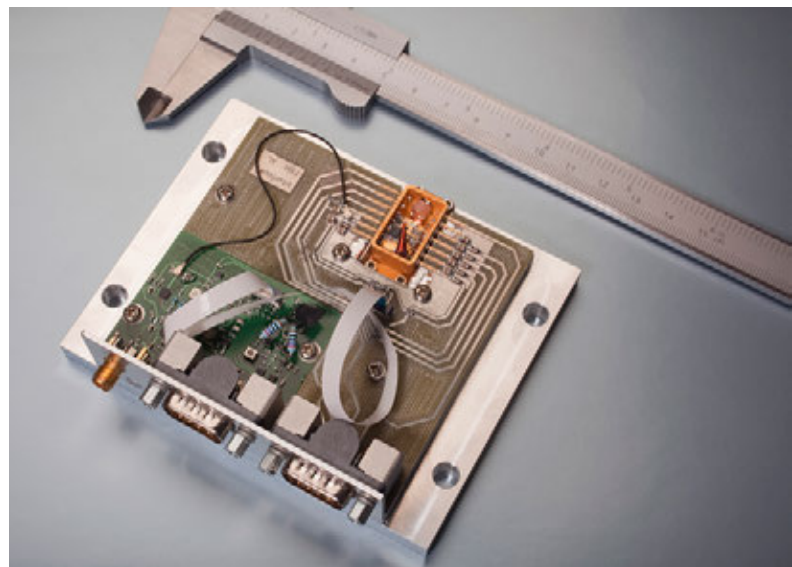
- Galliumnitridelektronik: Transistoren und Verstärker (hybrid, MMIC) – Entwurf, Fertigung, Kleinserie
- Mikrowellenplasmen
- Elektromagnetische Simulation
- Hochfrequenz- und Leistungsmesstechnik

## Hochleistungsdiodenlaser und LEDs

- Diodenlaser auf Galliumarsenid-Basis mit maßgeschneiderten Eigenschaften (Leistung, Wellenlänge, Linienbreite, Strahlgüte, Effizienz) – Entwurf, Fertigung, Kleinserie
- Hybride Lasersysteme im IR- und sichtbaren Spektralbereich
- Galliumnitrid-Laser und UV-LEDs
- Zuverlässigkeitsuntersuchungen

## Prozesse und 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-Photodetektoren



# 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 (spectral range 0.6–1.2  $\mu\text{m}$ )
- High-brightness lasers (linewidth < 10 MHz)
- Hybrid laser systems
- 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

# 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 and Systems

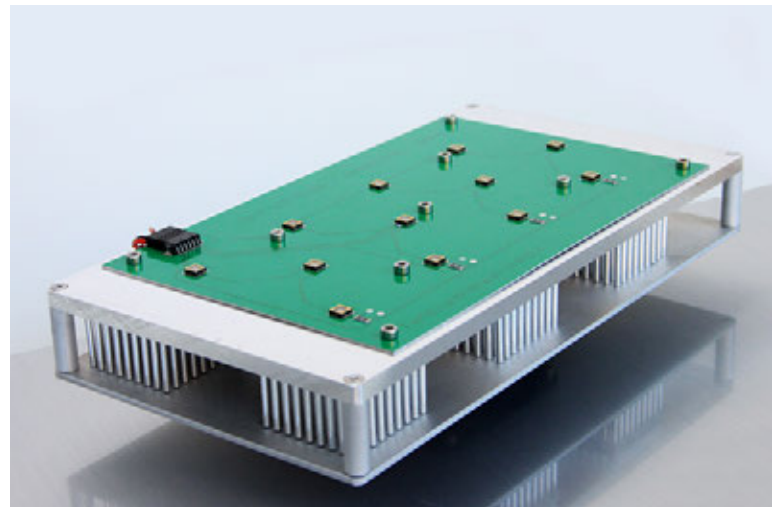
- Gallium nitride electronics: transistors and amplifiers (hybrid, MMIC)—design, production, small-scale series
- Microwave plasmas
- Electromagnetic simulation
- Microwave measurement and device characterization

## High-Power Diode Lasers and LEDs

- Gallium arsenide-based diode lasers with customized properties (output power, wavelength, spectral line width, brightness, efficiency)—design, production, small-scale series
- Hybrid laser systems in the IR and visible spectral range
- Gallium nitride lasers and UV LEDs
- Reliability investigations

## Processes and 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



## CONTACT | KONTAKT

Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik  
im Forschungsverbund Berlin e.V.  
Gustav-Kirchhoff-Str. 4  
12489 Berlin, Germany

Phone +49.30.6392-2600  
Fax +49.30.6392-2602  
Email fbh@fbh-berlin.de  
Web www.fbh-berlin.de

**Director**  
Direktor

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

**Deputy Director**  
Stellvertretender Direktor

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich  
Phone +49.30.6392-2620  
wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de

**Assistant to the Director**  
Referentin der Institutsleitung

Doreen Friedrich, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH)  
Phone +49.30.6392-3391  
doreen.friedrich@fbh-berlin.de

**Optoelectronics / Diode Lasers**  
Optoelektronik / Diodenlaser

Dr. rer. nat. Götz Erbert  
Phone +49.30. 6392-2656  
goetz.erbert@fbh-berlin.de

**Microwaves /  
Microwave Components & Systems**  
Mikrowellentechnik /  
Mikrowellenkomponenten & -systeme

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich  
Phone +49.30.6392-2620  
wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de

**GaN Optoelectronics**  
GaN-Optoelektronik

Prof. Dr. rer. nat. Michael Kneissl  
Phone +49.30.6392-2816  
michael.kneissl@fbh-berlin.de

**GaN Electronics**  
GaN-Elektronik

Dr.-Ing. Joachim Würfl  
Phone +49.30.6392-2690  
joachim.wuerfl@fbh-berlin.de

**Process Technology**  
Prozesstechnologie

Dr. rer. nat. Olaf Krüger  
Phone +49.30.6392-3205  
olaf.krueger@fbh-berlin.de

**Materials Technology**  
Materialtechnologie

PD Dr. rer. nat. Markus Weyers  
Phone +49.30.6392-2670  
markus.weyers@fbh-berlin.de

**Science Management**  
Wissenschaftsmanagement

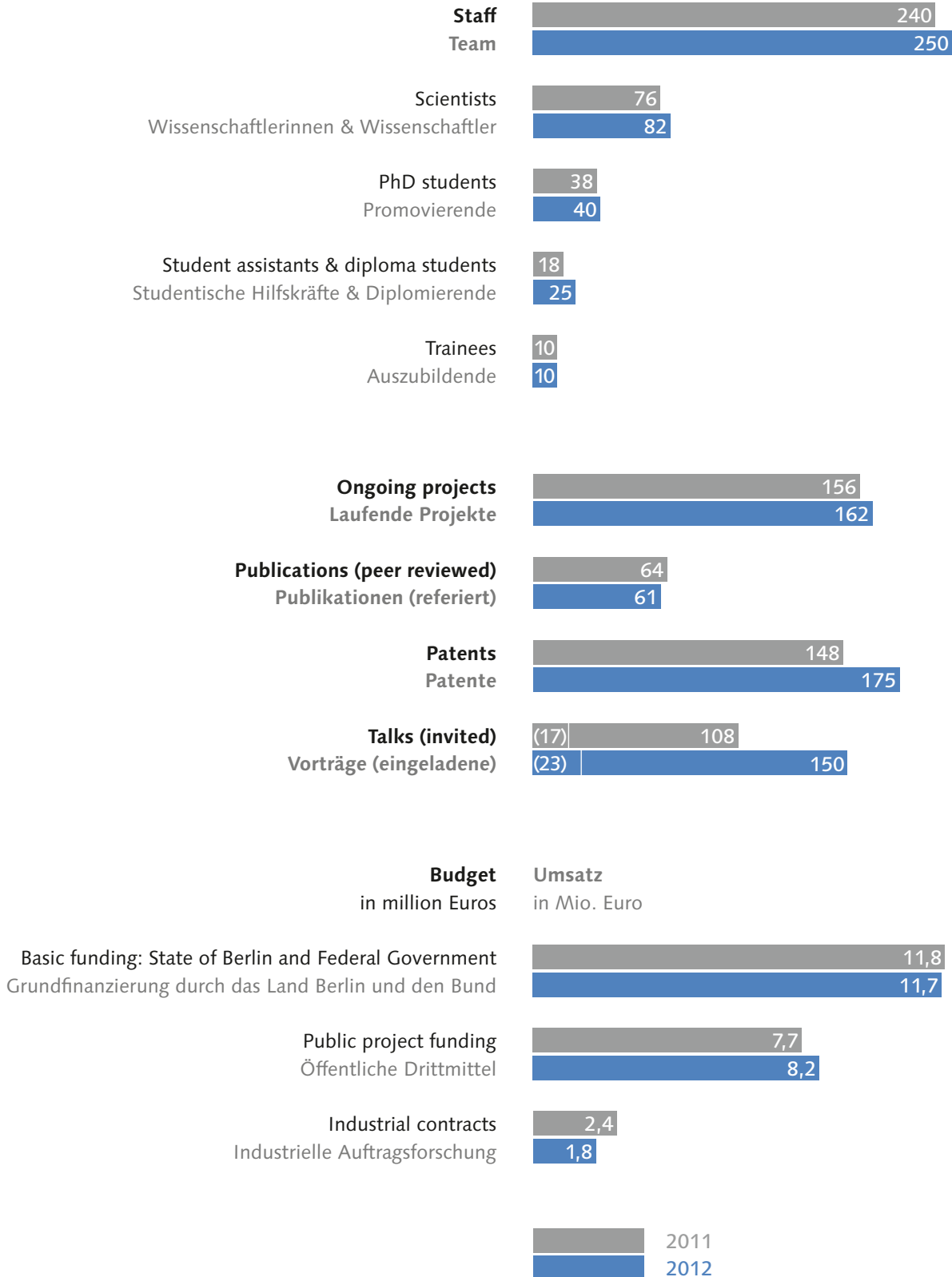
Nicolas Hübener, M.Sc., Dipl. Kfm. (FH)  
Phone +49.30.6392-3396  
nicolas.huebener@fbh-berlin.de

**Communications**  
Kommunikation

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

Founded 1992

Gegründet 1992



# ORGANIZATIONAL CHART | ORGANIGRAMM

<b>Board of Trustees of Forschungsverbund Berlin e.V.</b> Chairwoman Dr. J. Koch-Unterseher, SenBWF Berlin							
<b>Administrative Management</b> Dr. M. Urban Managing Director of FV Berlin				<b>Scientific Director</b> Prof. Dr. G. Tränkle Director of the FBH			
<b>Science Management</b> N. Hübener, M.Sc.		Strategy   Technology Transfer & Marketing   Education & Training   Administration   IT Support		<b>Central Services</b>		Communications   Quality Management   Technical Services	
Business Areas				Departments			
<b>Microwave Components &amp; Systems</b> Prof. Dr.-Ing. W. Heinrich	<b>GaN Electronics</b> Dr.-Ing. J. Würfl	<b>Diode Lasers</b> Dr. G. Erbert	<b>GaN Optoelectronics</b> Prof. Dr. M. Kneissl	<b>Microwaves</b> Prof. Dr.-Ing. W. Heinrich	<b>Optoelectronics</b> Dr. G. Erbert	<b>Materials Technology</b> PD Dr. M. Weyers	<b>Process Technology</b> Dr. O. Krüger
Frontend Power Amplifiers Low-Noise Components Microwave Plasmas Power Modules Terahertz Electronics	Microwave Transistors & MMICs Power Electronics	BA Lasers & Bars High-Brightness Lasers Hybrid Laser Systems Laser Sensors Laser Metrology	Nitride Laser Diodes UV LEDs	Electromagnetic Simulation Circuit Design Measurements & Packaging	Laser Design Laser Technology Mounting & Packaging Laser Measurements	Arsenides & Phosphides Nitrides Special Optical Devices Materials Analytics	Frontend Backend
<b>University Cooperations</b> Prof. Dr.-Ing. G. Böck - Microwave Technology (TU Berlin)   Prof. Dr. M. Kneissl - Experimental Nanophysics and Photonics (TU Berlin)   Prof. Dr. V. Krozer - Terahertz Photonics (Uni Frankfurt)   Prof. Dr. A. Peters - Optical Metrology (HU Berlin)							

## DER 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 seit Oktober 2012: Dr. Manuela Urban, davor Dr. Falk Fabich) 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.



**Forschungsverbund  
Berlin e.V.**

Rudower Chaussee 17  
12489 Berlin

Tel. +49.30.6392-3330  
Fax +49.30.6392-3333  
E-Mail urban@fv-berlin.de  
Web www.fv-berlin.de



# SCIENTIFIC BOARD | WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT

## Chair | Vorsitz

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

## Members | Mitglieder

Dipl.-Ing. Bernd Adelseck ..... Cassidian Electronics, Ulm  
Dr. Erich Auer ..... Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang  
Dr. Frank van den Bogaart ..... TNO Defence, Security and Safety, The Hague (NL)  
Prof. Dr. Christian Boit ..... Technische Universität Berlin, Berlin  
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  
Berry Smutny ..... DELOS Space GmbH, Frankfurt am Main  
Dr. Uwe Strauss ..... OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

## THE FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V.

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 since October 2012: Dr. Manuela Urban, before then: Dr. Falk Fabich) 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.



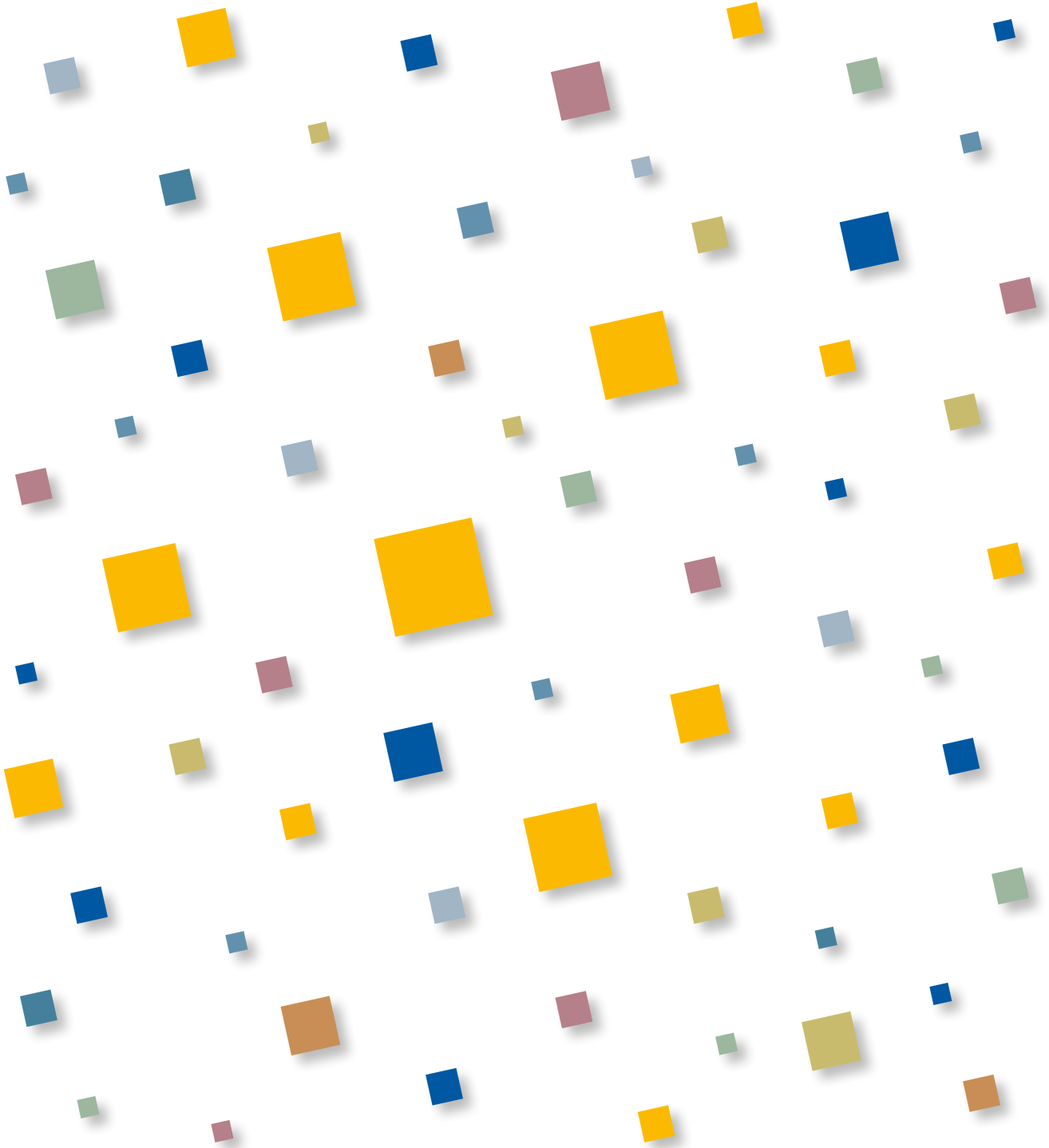
**Forschungsverbund  
Berlin e.V.**

Rudower Chaussee 17  
12489 Berlin, Germany

Phone +49.30.6392-3330  
Fax +49.30.6392-3333  
Email [urban@fv-berlin.de](mailto:urban@fv-berlin.de)  
Web [www.fv-berlin.de](http://www.fv-berlin.de)



# HIGHLIGHTS SCHLAGLICHTER



## TRANSFERPREIS FÜR ENTWICKLUNGEN AUS KOOPERATION MIT JENOPTIK

Im März 2012 wurde ein sechsköpfiges Team des Ferdinand-Braun-Instituts mit dem Transferpreis WissensWerte ausgezeichnet – Wissenschaftler des FBH waren 2004 bereits einmal Gewinner dieser Auszeichnung. Der Preis wird vom Förderverein der Technologiestiftung Berlin vergeben und ist mit 50.000 Euro dotiert. Er würdigt den nachhaltigen Transfer von Forschungsergebnissen besonders leistungsfähiger Diodenlaser für die Materialbearbeitung. Das von Dr. Götz Erbert geleitete Team hat eine neue Generation von Diodenlasern für leistungsstarke Lasersysteme in der Materialbearbeitung entwickelt. Derartige Systeme bestehen aus Diodenlasern, die zurzeit eine typische Ausgangsleistung von jeweils etwa 10 Watt liefern. Auf der Basis neuer Designs konnten die Ausgangsleistungen der einzelnen Diodenlaser um 20 % auf 12 Watt mit einem Wirkungsgrad von 63 % erhöht werden – angestrebt sind im nächsten Schritt 15 bis 20 Watt bei gleichbleibend hoher Effizienz und Strahlqualität. Dank dieser Leistungsmerkmale liefern die Laserquellen beste Voraussetzungen für rein Diodenlaser-basierte Lasersysteme. Die deutlich kompakteren Diodenlaser-Systeme könnten vor allem dank ihrer hohen Effizienz von > 60 % in der Materialbearbeitung künftig CO<sub>2</sub>-Laser oder Festkörperlaser ersetzen. In derartigen Anwendungen kommen Diodenlaser bislang meist nur als Pumplaser zum Einsatz.

Das FBH arbeitet auf diesem Gebiet besonders eng mit der Jenoptik Diode Lab GmbH zusammen. Das 2002 gegründete Spin-off des Instituts, das zum Jenoptik-Konzern gehört, nutzt Forschungsergebnisse des FBH für seine Diodenlaser. Dabei entstehen vielfältige Neu- und Weiterentwicklungen, mit denen sich das Unternehmen die internationale Technologieführerschaft bei derartigen Lasersystemen sichert. Seit 2006 betreibt das Unternehmen eine eigene Halbleiterfabrik in Berlin-Adlershof – in unmittelbarer Nähe zum Forschungspartner FBH. Aufgrund der hohen Kundennachfrage hat Jenoptik diese Fertigungskapazitäten 2012 mit einem Erweiterungsbau verdoppelt. Somit ist der Transferpreis zugleich Ausdruck und Anerkennung der fruchtbaren Zusammenarbeit mit industriellen Partnern wie Jenoptik.

## FBH – PARTNER FÜR DIE LOKALE UND REGIONALE WIRTSCHAFT

Dem FBH ist es 2012 gelungen, seine Kooperationen mit Partnern aus Industrie und Forschung weiter auszubauen. Nach wie vor nehmen lokale und regionale Kooperationen dabei einen zentralen Stellenwert ein. Die F&E-Ergebnisse aus dem FBH sichern somit die Wettbewerbsfähigkeit dieser Industriepartner und stärken die regionale Wirtschaft.

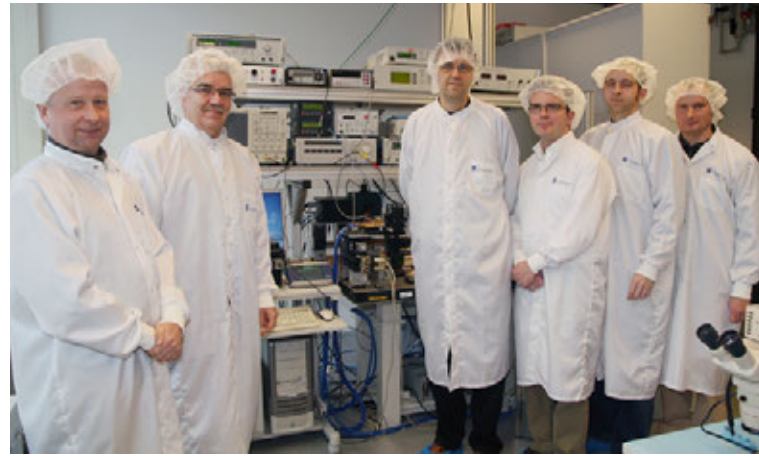
### **SENTECH – Weiterentwicklungen in der Plasmatechnologie**

Mit dem Unternehmen SENTECH Instruments GmbH verbindet das FBH eine langjährige Zusammenarbeit. Die Adlershofer Firma entwickelt, fertigt und vermarktet hochwertige Dünnschichtmesssysteme und Plasma-Prozesstechnikanlagen zum Ätzen oder Beschichten. Am FBH entwickelt SENTECH unter anderem seine Plasmasysteme für anspruchsvolle Ätzprozesse weiter. Dieses Know-how fließt direkt in die technologische Anlagenentwicklung des Unternehmens ein und bildet die Grundlage für zukünftige Innovationen auf dem Gebiet der Plasmaätz- und Abscheidetechnik. Im vergangenen Jahr wurde am FBH beispielsweise eine miniaturisierte Doppel-Plasmaquelle mit Mikrowellenansteuerung bei 2,45 GHz entwickelt. Dabei wird das Plasma in zwei Bohrungen mit 5 mm Durchmesser gleichzeitig angeregt. Die beiden Bohrungen sind mit einem Schlitz verbunden und bilden so einen

## TRANSFER AWARD FOR DEVELOPMENTS GAINED WITHIN JENOPTIK COOPERATION

In March 2012, a team from the Ferdinand-Braun-Institut was awarded with the Transfer Prize WissensWerte—FBH scientists had already won this award before in 2004. The prize is endowed with 50,000 Euro and assigned by the friends of the Technology Foundation Berlin (TSB). Six scientists, led by Dr. Götz Erbert, were honored for the sustainable transfer of research results concerning extraordinarily powerful diode lasers to be applied in materials processing. These systems consist of single diode lasers delivering each a typical output power of around 10 Watt. Based on novel designs, the output powers could be increased by 20 % to 12 Watt, achieving an efficiency of 63 %. Next development steps aim at 15 to 20 Watt while maintaining the excellent efficiency and beam quality of the diode lasers. Due to these properties, the laser sources set the stage for purely diode-laser-based systems for materials processing in the future. Especially their high efficiency of > 60 % makes the significantly more compact diode laser systems an attractive option to replace CO<sub>2</sub> and solid-state lasers. Materials processing systems, so far, use diode lasers mostly as pump sources and not directly.

In this field, FBH is closely cooperating with Jenoptik Diode Lab GmbH. The company, a subsidiary of the Jenoptik group, was spun-off from the institute in 2002 and continues using research results from the FBH for its diode lasers. The ongoing cooperation enables permanent improvements and is thus the basis for a great variety of new developments and advancements, helping Jenoptik to maintain its technology leadership position in the field of such laser systems. Since 2006, the company runs its own semiconductor fabrication in Berlin Adlershof—in close vicinity to the research partner FBH. Due to high customer demands, the company doubled its production capacities in 2012. Thus, the transfer prize also expresses and acknowledges such fruitful collaborations with industrial partners like Jenoptik.



▲ Die Träger des Transferpreises aus dem FBH: H. Wenzel, G. Erbert, S. Knigge, P. Crump, A. Maaßdorf, J. Fricke (v.l.n.r.).

The FBH transfer prize awardees: H. Wenzel, G. Erbert, S. Knigge, P. Crump, A. Maaßdorf, J. Fricke (f.l.t.r.).

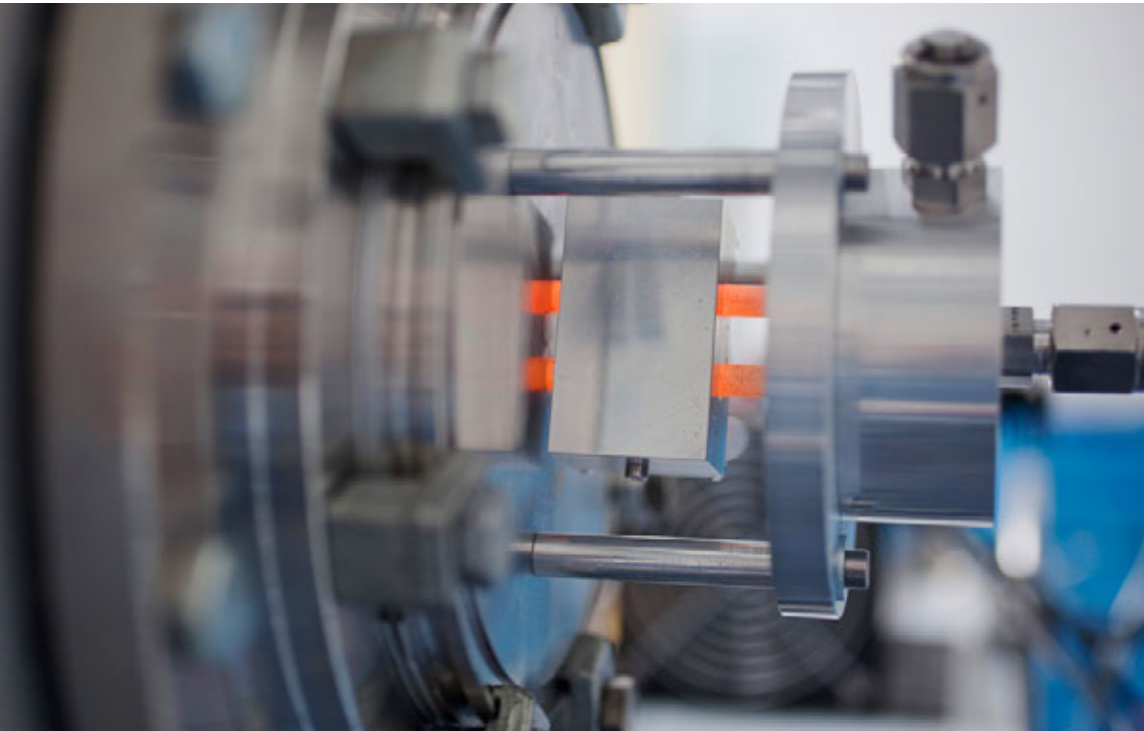
## FBH—PARTNER OF THE LOCAL AND REGIONAL INDUSTRY

In 2012, FBH succeeded to further expand cooperation with partners from industry and research. Still, local and regional collaborations are of core importance. Thus, R&D results from the FBH foster the competitiveness of its business partners and strengthen regional industry.

### SENTECH—advancements in plasma technology

Since many years, FBH and SENTECH Instruments GmbH have a close cooperation. The Berlin-based company develops, manufactures, and sells advanced quality instrumentation for thin film measurement and plasma process technology. Activities of SENTECH at FBH include advancements of the company's plasma systems for sophisticated etching. Know-how gained during the process directly influences the development of equipment by the company, thus forming the basis for further innovations in the field of plasma etching and vapor deposition technique. Last year, for example, a miniaturized double plasma source with microwave excitation at 2.45 GHz was developed at FBH, exciting the plasma via two 5 mm holes at the same time. Both holes are connected with a trench, thus forming a microwave resonator that can be easily fabricated and causes only minor stray fields. Experiments demonstrated that

Mikrowellenresonator, der sehr einfach hergestellt werden kann und nur geringe Streufelder erzeugt. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass die Mikrowellen-Energie mit hoher Effizienz von mehr als 85 % in das Sauerstoff-Plasma eingekoppelt werden konnte. Mit dieser kompakten Plasmaquelle können sowohl  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - als auch  $\text{AlN}$ -Schichten abgeschieden werden. Dies wurde bei SENTECH bereits erfolgreich getestet; die Messungen wurden bei einem Durchfluss von atomarem Sauerstoff von  $> 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  durchgeführt. Bei mehr als 100.000 Durchläufen verhielt sich die Quelle stabil mit reproduzierbaren Ergebnissen. Sie lieferte bei 4-Zoll-Siliziumwafern exzellente Uniformitäten der Schichtdicken von  $< 1\%$  und des Brechungsindex.



◀ Vom FBH entwickelte induktivgekoppelte Doppel-Plasmastrahlquelle bei Sentech für die atomare Schicht-Epitaxie.

*Inductively-coupled double plasma jet source developed by FBH at Sentech for plasma-enhanced atomic layer deposition.*

### **sglux – erfolgreich am Markt mit UV-Photodioden**

Eine Erfolgsgeschichte ist auch die Zusammenarbeit des FBH mit dem Berliner Unternehmen sglux GmbH – sowohl im Hinblick auf die Forschungsergebnisse wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht. Durch die enge Kooperation mit den Forschungspartnern Ferdinand-Braun-Institut und Leibniz-Institut für Kristallzüchtung ist es gelungen, Siliziumcarbid (SiC)-UV-Photodioden zu entwickeln, die zu den leistungsfähigsten derzeit erhältlichen Halbleiter-Detektoren im UV-Bereich von 200 nm bis 380 nm gehören. Sie bieten insbesondere eine hohe „visible blindness“ von  $> 10^{10}$  – damit sind sie unempfindlich für sichtbare Strahlung – und einen sehr niedrigen Dunkelstrom von  $< 5 \text{ fA}$ . Dadurch sind sie selbst für empfindliche Messungen exzellent geeignet. Die Dioden zeigen darüber hinaus eine große Strahlungsfestigkeit, das heißt sie bleiben auch bei langer Bestrahlung stabil. Derartige UV-Photodioden sind zentrale Komponenten in einer Vielzahl von Anwendungen, von der Prozessüberwachung bis zu biomedizinischen Analysen. Sie liefern vor Ort wichtige qualitative und quantitative Informationen über die eingesetzte UV-Strahlung.

Seit Anfang 2011 prozessiert das FBH Wafer mit Photodioden, die von sglux dann vereinzelt, aufgebaut und vermarktet werden. Die Photodioden werden dabei stetig weiterentwickelt, im Layout und nach kundenspezifischen Erfordernissen angepasst. Im vergangenen Jahr ist es gelungen, den Prozess weiter zu stabilisieren und zu vereinfachen. Durch die ausgezeichneten Leistungsparameter der Photodioden konnte sich sglux eine dominierende Marktstellung in einem Nischenmarkt erarbeiten und seinen Umsatz im vergangenen Jahr mehr als verdoppeln, ebenso wie die Mitarbeiterzahl.

microwave energy could be coupled into oxygen plasma with a high efficiency of more than 85 %. With the compact plasma source,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as well as  $\text{AlN}$  layers could be deposited, as was successfully demonstrated at SENTECH. The measurements were performed with atomic oxygen at a flow rate of  $> 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . During more than 100,000 runs the source remained stable delivering reproducible results. Based on 4-inch silicon wafers, excellent uniformity of the layer thickness ( $< 1\%$ ) and the refraction index could be achieved.

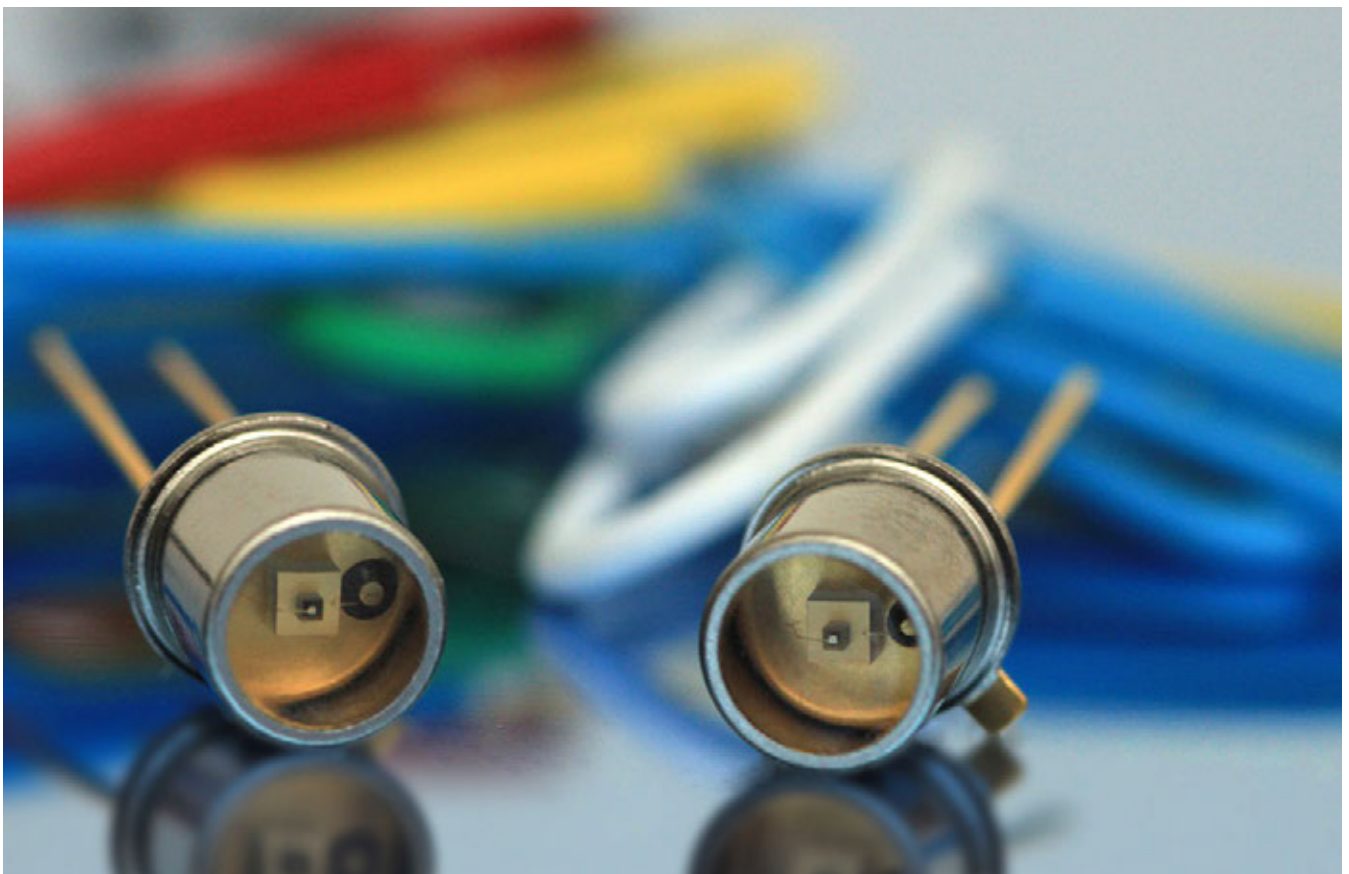
#### **sglux—successful on the market with UV photo diodes**

The cooperation of FBH with the Berlin-based company sglux GmbH is another successful example for regional cooperation—regarding research results as well as economic performance. As a result of its close collaboration with the research partners Ferdinand-Braun-Institut and Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ), sglux succeeded to develop silicon carbide (SiC) UV photodiodes ranking among the most capable currently available semiconductor detectors in the UV range from 200 nm to 380 nm. In particular, they exhibit a high visible blindness of  $> 10^{10}$ —accordingly they are insensitive to visible radiation—and a very low dark current of  $< 5 \text{ fA}$ . Thus, the diodes are excellently suited even for highly sensitive measurements. They additionally show a high radiation resistance and hence remain stable even under long-term exposure. Such UV photodiodes are key components in a great variety of applications, from process monitoring to bio-medical analytics, delivering important qualitative and quantitative in-situ information about the UV radiation applied.

Since the beginning of 2011, FBH has been processing wafers with photodiodes, which are then diced, assembled, and merchandized by sglux. The diodes have been constantly improved regarding layout and according to customer's requirements. The process could be further stabilized and simplified in the previous year. Due to the excellent characteristics of the photodiodes, sglux successfully captured a dominant market position within a niche market. Hence, the company has more than doubled its turnover as well as the number of employees.

▼ *Siliziumcarbid-Photodioden zur Detektion von UV-Strahlung.*

*Silicon carbide photodiodes to detect UV radiation.*



## INTERNATIONAL GUT AUFGESTELLT

Neben Industriaufträgen und öffentlichen Drittmittelprojekten aus Deutschland verzeichnete das FBH im vergangenen Jahr eine zunehmende internationale Nachfrage nach seinen Forschungsergebnissen. Dank wettbewerbsfähiger Ergebnisse und Entwicklungen stieg auch die Zahl der Projekte mit Unternehmen und Forschungspartnern aus dem Ausland. So werden beispielsweise innovative Diodenlaser mit einer um den Faktor 10 gesteigerten optischen Leistungsdichte und 20 % verbessertem elektro-optischem Wirkungsgrad für den Niedrigtemperaturbereich entwickelt. Diese sollen in zukünftigen Hochleistungslasersystemen zur Energiegewinnung und Grundlagenforschung genutzt werden. Partner in diesem Vorhaben sind die führenden Forschungsgruppen zur laserinduzierten Fusion, das Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien, USA, und HiPER in Großbritannien.

### EU-Projekte ausgebaut

Das vom Ferdinand-Braun-Institut koordinierte HiPoSwitch beschäftigt sich seit Ende 2011 mit neuartigen Galliumnitrid (GaN)-basierten Transistoren. Das EU-Projekt zielt auf energieeffizientere, kompaktere und leistungsfähigere elektronische Energiekonverter für vielfältige Applikationen, etwa in der Informations- und Kommunikationstechnologie oder bei der Umwandlung von Solarenergie. 5,6 Millionen Euro fließen über drei Jahre in das Verbundprojekt mit acht europäischen Partnern, die die komplette Wertschöpfungskette abdecken, von der Bauelemententwicklung bis zur industriellen Verwertung.

Im vergangenen Jahr konnten die Partner in HiPoSwitch deutliche Fortschritte erzielen. So ist es dem FBH in enger Zusammenarbeit mit dem belgischen Unternehmen EpiGaN gelungen, die bislang auf teuren Siliziumcarbid-Substraten demonstrierten Leistungstransistoren erfolgreich auf wesentlich kostengünstigere Silizium-Substrate zu transferieren. Die Transistoren wurden anschließend von den Industriepartnern Infineon und Artesyn Austria montiert, gehäust und getestet. Ein wesentliches Ziel dabei ist es, alle Schritte entlang der gesamten Entwicklungs- und Prozesskette modellhaft zu beschreiben, um die Auswirkungen von Bauelement-Anpassungen auf die Systemeigenschaften vorhersagen zu können. Parallel arbeiten die Universitäten Wien und Bratislava bereits an explorativen Konzepten auf der Basis neuer Materialien für die nächste Generation von GaN-Leistungsbaulementen.

Zusätzlich zu weiteren laufenden EU-Projekten am FBH kamen 2012 zwei neue hinzu: BRIDLE und FAMOS. Dank BRIDLE sollen künftig weltweit erstmalig kostengünstige, industrielle Diodenlaser-Systeme zum direkten Schneiden und Schweißen von Metallen für einen der größten Märkte zur Verfügung stehen. Die spektralen Eigenschaften der Diodenlaser sollen durch externe Gitter so optimiert werden, dass sie eine zehnmal höhere Brillanz im Vergleich zum Stand der Technik liefern. Im Rahmen von FAMOS entwickeln und erproben die Partner Lichtquellen für bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik in Augenheilkunde und Onkologie. Ziel ist es, ein neuartiges, kompaktes Gerät für die Optische Kohärenztomographie (OCT) zu entwickeln. Eines der Schlüsselemente ist ein Diodenlaser, der derzeit am FBH entwickelt wird und dessen exzellente Strahlqualität zu hochpräziser Fokussierbarkeit führt. Er pumpt einen Femtosekunden-Titan-Saphir-Laser, der dann die eigentliche OCT-Lichtquelle anregt. Mit einem entscheidenden Vorteil: Es soll dabei so wenig Wärme entstehen, dass die bislang erforderliche aufwändige Kühlung entfällt. Die Geräte können dadurch auf ein Fünftel ihrer bisherigen Größe schrumpfen, werden entsprechend billiger und mobil einsetzbar. Auch die Bedienung und Auswertung der Ergebnisse soll deutlich vereinfacht werden.



## INTERNATIONALLY WELL POSITIONED

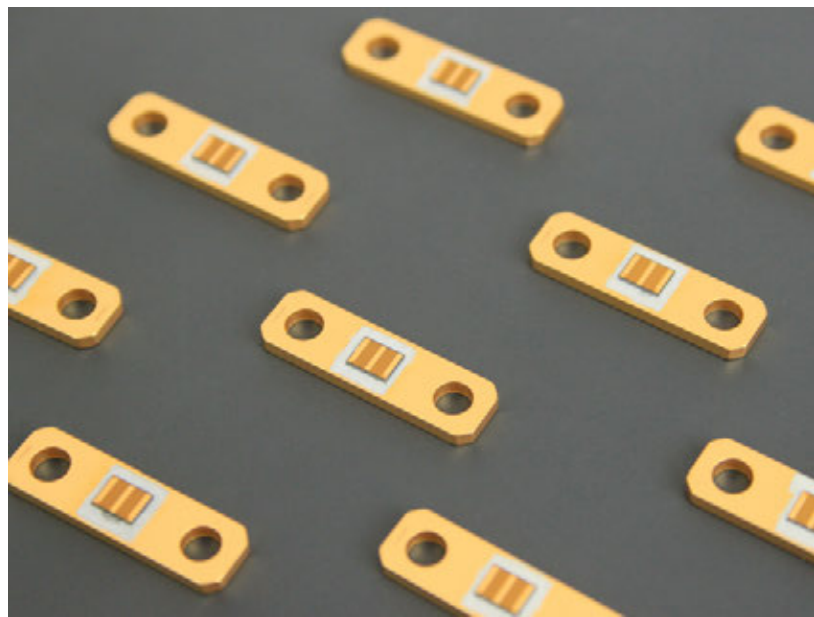
Beside industrial and public third-party projects in Germany, FBH can report a rising international demand for its research achievements. Due to competitive results and developments, the number of projects with companies and research partners from abroad increased. For example, innovative diode lasers with a tenfold increase in optical power density and a by 20 % enhanced electro-optical efficiency for sub-zero (200 K) applications are under development. They shall be used in future high-power laser systems for energy generation and basic research. Partners in this project are the two world-leading laser-induced fusion groups, the Lawrence Livermore National Laboratory in California, USA, and HiPER in Great Britain.

### More EU projects

Since the end of 2011, HiPoSwitch is concerned with gallium nitride (GaN)-based transistors. The EU project, which is coordinated by the Ferdinand-Braun-Institut, addresses energy-efficient, compact and powerful electronic power converters for a great variety of applications including information and communication technology as well as transformation of solar energy. The joint project with eight European partners covers the whole value chain, from device development to industrial application, and has acquired 5.6 million Euros for a three-year period.

In the previous year, the HiPoSwitch partners made significant progress. The FBH in close cooperation with the Belgian company EpiGaN, for example, succeeded in transferring power transistors from high-cost silicon carbide substrates to significantly cheaper silicon substrates. The transistors were then mounted, packaged, and tested by the industrial partners Infineon and Artesyn Austria. Particularly important at that stage was to exemplarily describe all steps along the development and process chain to be able to predict effects of device adjustments on the system properties. In parallel, the universities of Vienna and Bratislava are already preparing explorative concepts based on new materials for next-generation GaN power devices.

In 2012, two new EU projects added to the ongoing ones at the FBH: BRILDE and FAMOS. BRILDE aims to provide, for the first time world-wide, cost-efficient industrial diode laser systems used for direct cutting and welding of metals—which is also one of the most attractive and biggest commercial markets. The spectral properties of the diode lasers shall be optimized by external gratings in a way that they deliver a tenfold higher brilliance compared to the state-of-art. Within the frame of FAMOS, the partners develop and test light sources for imaging systems to be used for medical diagnostics in ophthalmology and oncology. Efforts are aiming to develop a novel, compact tool for optical coherence tomography (OCT). One of the key elements is a diode laser that is currently under development by FBH featuring an excellent beam quality and that is highly focusable at the same time. It will be used to pump a femtosecond titan-sapphire laser, which will subsequently excite the actual OCT light source—with one decisive advantage: With the FBH diode laser, the heat generated is so low that the so far required complex cooling effort becomes dispensable. Thus, the devices can shrink to one fifth of their current size, and will accordingly become cheaper and portable. Usability and interpretation of the results shall additionally be facilitated.



▲ 600 Volt GaN-Transistoren, die im EU-Projekt HiPoSwitch am FBH entwickelt wurden.

600 Volt GaN transistors developed within the EU project HiPoSwitch at FBH.

### Korea: Laserquellen für 3D-Displays

Rasant entwickelte sich die Kooperation mit dem Korean Electronics Technology Institute (KETI). Ende August wurde ein Memorandum of Understanding in Berlin zu Laserquellen für 3D-Displays unterzeichnet. Nur wenig später verteidigte das FBH das Projekt gemeinsam mit KETI in Korea, Ende 2012 lag bereits die Projektzusage vor: Im ersten Schritt fließen nun von koreanischer Seite 645.000 US-Dollar über drei Jahre an das FBH. Bei Erreichen der Projektziele ist die Verlängerung und Finanzierung für weitere zwei Jahre geplant. Drei Laserstrahlquellen mit hybrid-integrierten Laserdioden sollen für den roten, grünen und blauen Spektralbereich entwickelt werden. Angestrebt sind Ausgangsleistungen von mehr als 1 Watt mit guter Strahlqualität und schmaler Linienbreite < 5 MHz. Das Projekt kann dabei auf Ergebnissen der InnoProfile-Initiative „Hybride Diodenlaser-Systeme – Berlin“ aufbauen.

Dank erstklassiger Partner befindet sich das Projekt in einer ausgezeichneten Ausgangsposition: KETI ist als Forschungspartner die Schnittstelle zum koreanischen Unternehmen QSI, das die am FBH entwickelten Demonstratoren auf die Prozesse der industriellen Massenfertigung anpasst. Anschließend sollen die Diodenlaser-Module von LG Display in deren 3D-Systeme eingebaut werden.

### Japan: Leistungsverstärker für hocheffiziente digitale Übertragungen

Nicht nur im Bereich der Diodenlaser, sondern auch in der Mikrowellentechnik starteten interessante internationale Kooperationen. So haben FBH und die NEC Corporation, Japan, ein Projekt begonnen, um neuartige, hocheffiziente digitale Übertragungskonzepte zu entwickeln. Diese sind die Voraussetzung für wachsende Anforderungen an die technische Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz im Bereich der mobilen und drahtlosen Kommunikation. In einem ersten Schritt wurde ein kürzlich von NEC entwickelter Envelope Delta-Sigma Modulator (EDSM) mit einem Klasse-S-Leistungsverstärker aus dem FBH kombiniert und in einem gemeinsamen Experiment untersucht. Mit der vorgeschlagenen Schaltungsarchitektur für das 450-MHz-Frequenzband wurden erstklassige Ergebnisse für Standardkommunikationssignale wie WCDMA erreicht.

Der EDSM von NEC ist in der Lage, 1-Bit-Sequenzen für Schaltverstärker bereitzustellen und verschiedene Frequenzbänder und mobile Breitbandstandards (3GPP) abzudecken. Neben verschiedenen vorteilhaften Leistungsmerkmalen bietet der Modulator auch das Potenzial, die Verluste des Hochfrequenz-Leistungsverstärkers deutlich zu reduzieren. Er eignet sich besonders für moderne Switchmode-Leistungsverstärker-Konfigurationen, wie etwa Klasse D oder S. Derartige Galliumnitrid-basierte Klasse-S-Leistungsverstärker werden am FBH seit mehreren Jahren erfolgreich entwickelt. Das Klasse-S-Konzept bietet zahlreiche Vorteile, wie Multi-Band-Fähigkeit, hohe Effizienz und digitale Signalverarbeitung bis hin zur Antenne. Die erreichten herausragenden Ergebnisse etablieren einen neuen Stand der Technik. Sie liefern die Grundlage für weitergehende Untersuchungen von Verstärker-Konfigurationen und Techniken zur Effizienzsteigerung.

### Industriekooperationen mit US-Unternehmen ausgebaut

Auch die Kontakte in den US-amerikanischen Markt wurden intensiviert. So wurde die langjährige erfolgreiche Kooperation mit der Trumpf-Gruppe auf dem Gebiet der industriellen Laser und Lasersysteme im vergangenen Jahr international erweitert. Besonders die Zusammenarbeit mit dem US-Tochter Trumpf Photonics Inc., Cranbury, New Jersey, wurde ausgebaut; dies betraf insbesondere den Bereich der Passivierung von Laserfacetten. Dieser Technologieschritt wurde bisher beim Forschungspartner FBH durchgeführt und soll künftig im



▲ KETI-Präsident Kim Kyung-Won und FBH-Direktor Günther Tränkle bei der Unterzeichnung des Memorandums of Understanding in Berlin.

*Kim Kyung-Won, President of KETI, and FBH Director Günther Tränkle at the signing ceremony of the Memorandum of Understanding in Berlin.*

### **Korea: laser sources for 3D displays**

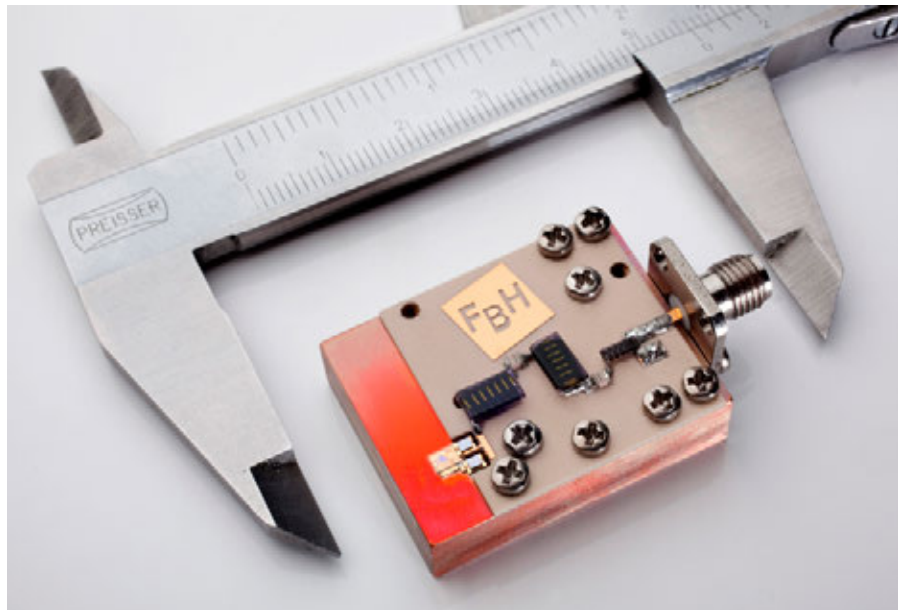
The cooperation, which was started in 2012 with the Korean Electronics Technology Institute (KETI) proceeded rapidly: At the end of August, a Memorandum of Understanding concerning laser sources for 3D displays was signed. Only soon after that, FBH defended the joint project with KETI in Korea, by the end of 2012 the project was approved. In a first step, 645,000 US Dollar go to the FBH over a three-year period. Further financing and a prolongation for additional two years are planned once the project aims are reached. Within the project, three laser sources with hybrid-integrated laser diodes shall be developed for the red, green, and blue spectral range. Developments aim at output powers of more than 1 Watt with good beam quality and a small linewidth of < 5 MHz. The project is not starting from scratch but can build up on results of the InnoProfile initiative "hybrid diode laser systems Berlin".

Due to premier partners, the project is also in an excellent starting position: The research partner KETI acts as interface to the Korean company QSI, who will then align the demonstrators developed by FBH to the processes of industrial mass production. Subsequently, LG Displays is planning to mount these diode laser modules into their 3D systems.

### **Japan: power amplifiers for high-efficiency digital transmissions**

Not only in the area of diode lasers but also in microwave technology exciting international R&D activities started. FBH and NEC Corporation, Japan, launched a joint project to develop novel, highly efficient digital transmission concepts. They target the growing demands regarding modulation capabilities and energy efficiency in the field of mobile and wireless communications. In a first step, an envelope delta-sigma modulator (EDSM) developed by NEC Corporation, Japan, and a class-S power amplifier (PA) module were tested in a joint experiment. Best-in-class results were achieved with the proposed architecture for the 450 MHz band using standard communication signals like WCDMA.

The EDSM developed by NEC is capable of providing 1-bit sequences for switching amplifiers, covering different frequency bands and mobile broadband standards (3GPP). Apart from additional advantageous features, this modulator also shows the potential to significantly reduce losses of switch-mode PAs. It is particularly suitable to drive advanced switch-mode PA configurations like the class-D/S type, which have been successfully developed at FBH since several years. Such GaN-based class-S PAs provide various advantages, e.g. multi-band capabilities, digital operation up to the antenna and high efficiency. The now achieved outstanding results established the state-of-the-art in this field and form the basis for further investigations into amplifier topologies and efficiency-enhancement techniques.



▼ Klasse-S-Leistungsverstärker für das 450-MHz-Frequenzband.

Class S power amplifier for the 450 MHz band.

### **Industry cooperation with US companies intensified**

The activities within the US-American market developed similarly successful, especially regarding the long-term cooperation with Trumpf group in the industrial lasers and laser systems field. This particularly affects the process of laser facet passivation with the subsidiary Trumpf Photonics Inc., Cranbury, New Jersey. So far, this technology step has been performed by the research partner FBH and is now supposed to be integrated via a licensing agreement into Trumpf's own value chain. To prepare this know-how transfer, comprehensive qualification of the technology steps were accomplished at FBH, ensuring a smooth integration into the company's process chain.

Rahmen einer Lizenzierungs-Vereinbarung in die eigene Wertschöpfung bei Trumpf integriert werden. Um diesen Know-how-Transfer vorzubereiten, fanden am FBH umfassende Qualifizierungen der Technologieschritte statt, die die reibungslose Eingliederung in die Prozesskette sichern sollen.

Neue Projekte sind mittlerweile auch mit Corning, dem weltweit führenden Anbieter von Spezialglas und Keramiken, in Vorbereitung. Anlässlich der Eröffnung des Corning-Technologiezentrums in Adlershof hatte sich der Forschungschef von Corning aus den USA im September über potenzielle Forschungspartner am Standort informiert. Das FBH stellt seine Kompetenz, unter anderem im Bereich der Lasermetrologie, vor. Vor dem Hintergrund der Neuausrichtung des Konzerns haben inzwischen weitere vielversprechende Gespräche im Bereich der Diodenlaser stattgefunden.

## GRUNDLAGEN- & ANWENDUNGSORIENTIERUNG – ERFOLGREICHE KOOPERATIONEN MIT UNIVERSITÄTEN

### HautScan – Einstein-Projekt mit hochkarätigen Partnern gestartet

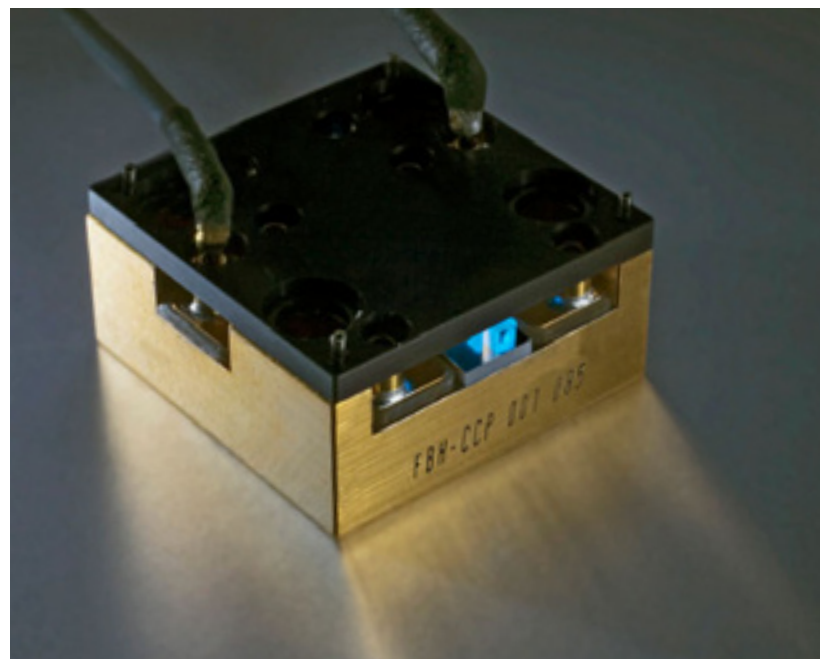
Im Rahmen des Einstein-Forschungsvorhabens HautScan sollen Substanzen auf der Haut mittels einer nicht-invasiven optischen Methode nachgewiesen werden. Drei Jahre lang arbeiten die Teams um FBH-Direktor und TU-Professor Günther Tränkle und um Charité-Professor Jürgen Lademann gemeinsam an der Entwicklung eines tragbaren Messsystems. Damit sollen künftig medizinische Substanzen mittels Raman-Spektroskopie an der Hautoberfläche nachgewiesen werden. Für das im August gestartete Grundlagenprojekt wurde das Chemotherapeutikum Doxorubicin als erster Untersuchungsgegenstand ausgewählt. Das Medikament kommt unter anderem bei Brust- oder Knochenkrebs-Patienten zum Einsatz und verursacht häufig das schmerzhafteste Hand-Fuß-Syndrom. Bei der Behandlung tritt nämlich ein Teil des Wirkstoffs mit dem Schweiß durch die Haut aus und greift diese dann an. Daher gilt es, die Vorgänge genau zu verstehen und diesen Zeitpunkt präzise zu überwachen, um frühzeitig behandeln zu können und die Therapie zu sichern.

Das FBH entwickelt die Lichtquelle, basierend auf einem Diodenlaser, und das komplette optische System. Der Messkopf soll nicht viel größer als ein Laserpointer sein – und damit geeignet für ein portables System, mit dem die grundlegenden Untersuchungen des Hautphysiologen Jürgen Lademann an der Charité durchgeführt werden. Damit sollen erstmalig Daten von Messungen am Patienten erfasst und statistisch ausgewertet werden. Die Rückmeldungen aus der medizinischen Praxis fließen wiederum direkt in die technischen Anpassungen ein.

Erfahrungen gibt es am FBH bereits seit längerem bei der Entwicklung von maßgeschneiderten Lichtquellen für die Sensorik. Die Physiker haben sich bei HautScan für eine besondere technische Lösung entschieden. Damit die Raman-Linien nicht von einem um mehrere Größenordnungen stärkeren, breiten Fluoreszenzspektrum überdeckt werden, regen sie die Proben mit zwei dicht beieinanderliegenden Wellenlängen an. Dadurch lassen sich die schwachen Signale herausfiltern, denn die Fluoreszenz ändert sich dabei kaum – die Raman-Linien verschieben sich jedoch und können vom Störlicht getrennt werden. Doxorubicin wird dabei nur der erste Schritt sein, denn mittels Raman-Spektroskopie lassen sich viele

▼ FBH-Lasermodule im Briefmarkenformat, das „Fingerabdruck-Spektren“ zum Nachweis bestimmter Substanzen liefert.

*FBH laser module in stamp size delivering “fingerprint” spectra to detect specific substances.*



New projects are currently being prepared with Corning, the world leading supplier for special glass and ceramics. On the occasion of the opening of Corning's technology center in Adlershof, the US chief research officer informed himself on potential research partners on the campus. FBH introduced the institute's competence with particular focus on the laser metrology field. Meanwhile, in view of the group's reframing process, talks were extended to further application fields of diode lasers.

► Günther Tränkle (re.) zeigte dem Corning-Forschungschef Dr. Jean-Pierre Mazeau (2. v.l.) aktuelle Entwicklungen aus dem FBH im Bereich Diodenlaser.

Günther Tränkle (r.) showing Dr. Jean-Pierre Mazeau (2<sup>nd</sup> f.l.), Corning's US chief research officer, current FBH achievements in diode laser technology.



## BASIC & APPLICATION-ORIENTED RESEARCH— SUCCESSFUL COOPERATION WITH UNIVERSITIES

### HautScan—kick-off for Einstein project with top partners

Within the Einstein research project HautScan, which started in August, a non-invasive optical method shall be used to identify substances on the skin. The teams, led by FBH director and TU professor Günther Tränkle and by Jürgen Lademann, professor at Charité Berlin, will jointly develop a suitable mobile measuring system. With it, medical substances shall be detected on the surface skin by using Raman spectroscopy. The chemotherapeutic substance Doxorubicin was chosen as first object of study. This medication, used, among others, for the treatment of breast and bone cancer patients, often causes the painful hand-foot syndrome. During treatment, the skin gets affected by parts of the active agent, which passes with perspiration through the skin. Thus, in addition to a thorough general understanding of the related physical processes, this moment needs to be precisely monitored to ensure timely treatment and therapeutic success.

In the basic research project, the FBH develops the light source based on a diode laser and the overall optical system. The detector head shall be very compact, not much bigger than a laser pointer and thus enabling a portable system. It will be used for basic investigations executed by the skin physiologist Jürgen Lademann at Charité. He and his team, for the first time, acquire and statistically evaluate data of measurements obtained from patients. This allows the partners to implement the feedback from medical experience directly into technical adjustments.

The FBH has long-term experience in developing tailored light sources for sensor technology. Regarding HautScan, the scientists decided for a special technical solution: To avoid that the Raman lines are covered by much stronger and broader fluorescence spectra, samples are excited with two closely adjoining wavelengths. Thus, weak signals can be filtered out because fluorescence signals change only slightly but Raman lines shift and can accordingly be separated from stray light. Doxorubicin will only be the first step, as Raman spectroscopy allows to precisely analyze various substances. To achieve this, monochromatic light is used as it backscatters differently, depending on the molecular structure of the substance it is irradiated on. The result is a characteristic pattern of Raman signals—as unique as a fingerprint.

Substanzen präzise analysieren. Monochromatisches Licht wird – je nach Molekülaufbau der Substanz, auf die es eingestrahlt wird – unterschiedlich zurückgestreut. Das Resultat ist ein charakteristisches Muster aus Raman-Signalen, einzigartig wie ein Fingerabdruck.

### **AdMiRe – Mikroresonatoren höchster Güte für Präzisionsanwendungen**

Optische Mikroresonatoren höchster Güte sollen im Grundlagenforschungsprojekt AdMiRe entstehen. In dem Projekt arbeiten das FBH und die Arbeitsgruppe Nanooptik von Prof. Oliver Benson von der Humboldt-Universität (HU) zu Berlin eng zusammen. Das Entwicklungsziel des 2012 gestarteten „Joint Labs“ ist eine neuartige Technologieplattform, die den Einsatz von mikro-integrierten monolithischen optischen Resonatoren höchster Güte in Präzisionsanwendungen ermöglicht. Dazu gehören insbesondere die hochgenaue Sensorik, Analytik und Lasermesstechnik sowie die optische Telekommunikation, Zeit- und Frequenzmesstechnik und die hochgenaue globale Navigation. Im Rahmen des „Joint Labs“ schafft ein siebenköpfiges integriertes Team die Voraussetzungen für den Einsatz der Technologie der Mikroresonatoren und für deren Kommerzialisierung.

Derartige Resonatoren zeichnen sich durch ihre sehr geringe Größe aus und speichern das Licht durch interne Totalreflektion. Die Designs entstehen in Kooperation zwischen dem FBH und der HU Berlin, auch die zugehörigen Experimente finden an beiden Einrichtungen statt. Das FBH realisiert und charakterisiert die winzigen Strukturen in Form von Scheiben (Disks) und wulstartigen Toroiden, die wie Mini-Donuts aussehen – ein Torus hat einen typischen Durchmesser von 100 Mikrometern und ist nur wenige Mikrometer dick. Mithilfe von optimierten Glasfasern kann Licht ein- und ausgekoppelt werden. Die Wellenleiter werden in einem Abstand von einem Mikrometer oder weniger tangential vorbeigeführt. Zudem sollen diese monolithisch integriert werden, was den Herstellungs- und Aufbauprozesses vereinfacht. Diese Mikroresonatoren lassen sich zudem mit mikro-integrierten Lasersystemen zu kompakten und robusten optischen Systemen integrieren, die auf die jeweiligen Anwendungen maßgeschneidert werden können.

Dank der sehr engen Abstimmung im „Joint Lab“ können notwendige Anpassungen rasch umgesetzt werden. Dies führt zu effizienteren und schnelleren Entwicklungsprozessen. Zugleich erweitert das FBH mit mikro-integrierten Lasersystemen seine Kompetenz bei der Chipherstellung um die Systemintegration. Die HU Berlin wiederum hat direkten Einfluss auf die Technologieentwicklung und unmittelbaren Zugriff auf maßgeschneiderte Mikroresonatoren – dies sind entscheidende technologische Vorteile bei der wissenschaftlichen Arbeit. Nicht zuletzt verschafft die völlig neuartige und hochinnovative Technologie den Partnern national wie international einen Entwicklungsvorsprung und damit einen Wettbewerbsvorteil am Markt. Dies stärkt auch die Region Berlin-Brandenburg, da mikrooptische Resonatoren für Anbieter von Kurzpuls-Lichtquellen wie etwa Spektrometern oder von optischen Sensoren kommerziell überaus attraktiv sind – geeignete Industriepartner gibt es bereits vor Ort.

### **An die Grenzen des Machbaren – einkristalline Superspiegel für die Präzisionsmetrologie**

Präzisions-Interferometer spielen eine zentrale Rolle, wenn es um grundlegende physikalische Fragestellungen geht. Wer auf die Zehntelsekunde genau ermitteln möchte, wie alt unser Universum ist, oder theoretisch vorhergesagte Gravitationswellen nachweisen will, ist auf Messungen von höchster Genauigkeit angewiesen. Die Leistungsfähigkeit und Auflösung der dafür genutzten Präzisions-Interferometer hängt entscheidend davon ab, wie viel Licht in den eingesetzten Kavitäten verloren geht. Selbst bei ansonsten perfekten Spiegeln führt Streuung an Gitterschwingungen zu Dämpfungen. Daher zielt ein Grundlagenprojekt am FBH auf optimierte, rauscharme kristalline Spiegel für die Präzisionsmetrologie. Damit sollen die Grenzen des bislang Messbaren deutlich erweitert werden.

Unter dem Titel „Low Noise Crystalline Mirrors for Precision Metrology“ bringt das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt die Teams von Dr. Markus Weyers vom FBH, Prof. Achim Peters von der Humboldt-Universität zu Berlin und

### AdMiRe—microresonators of utmost quality for high-precision applications

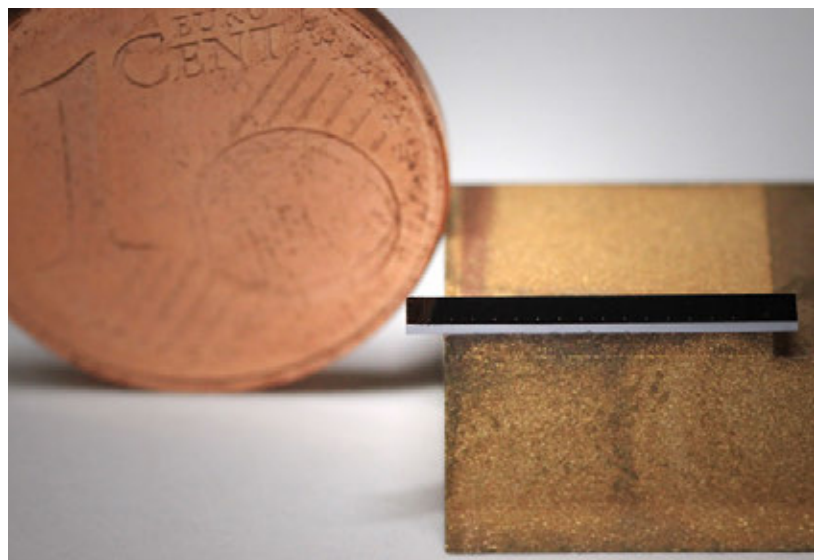
High-quality optical microresonators are in the focus of the basic research project AdMiRe. Within the project, FBH closely cooperates with Prof. Oliver Benson from the nano photonics group at Humboldt-Universität (HU) zu Berlin. Activities of the "joint lab", which was initiated in 2012, are aiming to develop a novel technology platform, enabling the use of micro-integrated monolithic optical resonators of highest quality for precision applications. These include high-precision sensors, analytics, laser measurement technology as well as optical communications, time and frequency measurement technology, and high-precision global navigation. Within the "joint lab", an integrated team consisting of seven scientists is working to lay the foundations for bringing the technology of microresonators into application and subsequent commercialization.

Such resonators are characterized by their very small size and their ability to store light by total internal reflection. The designs are developed jointly by FBH and HU Berlin and tested in corresponding experiments, which are also taking place at both research facilities. The FBH realizes and characterizes the tiny structures shaped like disks and bulged toroids looking like mini-donuts. Such a toroid features a typical diameter of 100 micrometer and is only a few micrometers thick. By using optimized glass fibers, light can be coupled in and out. The waveguides bypass tangentially at a distance of one micrometer or less. They shall, additionally, be monolithically integrated to facilitate the manufacturing and assembling process. Together with micro-integrated laser systems, these microresonators can be assembled as compact and robust optical systems, which can be tailored precisely and flexibly according to the requirements of the specific application.

Due to the close-knit cooperation within the "joint lab", necessary technical adjustments can be implemented very quickly. This leads to more efficient and much faster decision-making processes. Moreover, the FBH expands its competencies with such micro-integrated laser systems from chip manufacturing to systems integration. HU Berlin, in turn, can directly influence technology development and has straight access to tailored microresonators—these are core technological advantages in scientific work. Last but not least, the completely novel and highly innovative technology leads to a developmental edge and thus a competitive advantage on the market. Such micro-optical resonators are commercially highly attractive for suppliers of short-pulse light sources such as spectrometers and optical sensors. Thus, these activities also foster the position of the Berlin-Brandenburg region—the appropriate industrial partners are already on site.

### Pushing the limits of what is feasible—monocrystalline super mirrors for precision metrology

Precision interferometers play a crucial role when it comes to fundamental physics issues. Measurements of highest precision are a precondition if one wants, for example, to determine precisely to a tenth of a second how old our universe is and to demonstrate gravitational waves that have been predicted only theoretically so far. The capability and resolution of the precision interferometers used for such measurements strongly depend on how much light gets lost in the cavities. Even for otherwise perfect mirrors, scattering due to lattice vibration leads to attenuation. Thus, a basic research project at FBH aims to develop optimized, low-noise crystalline mirrors for precision metrology. With them, the limits of what is measurable up to now shall be significantly stretched.



▲ Silizium-Chip mit einer Reihe von Mikrodisk-Resonatoren, die im Rahmen von AdMire entwickelt wurden.

Silicon chip with an array of microdisk resonators developed within AdMire.

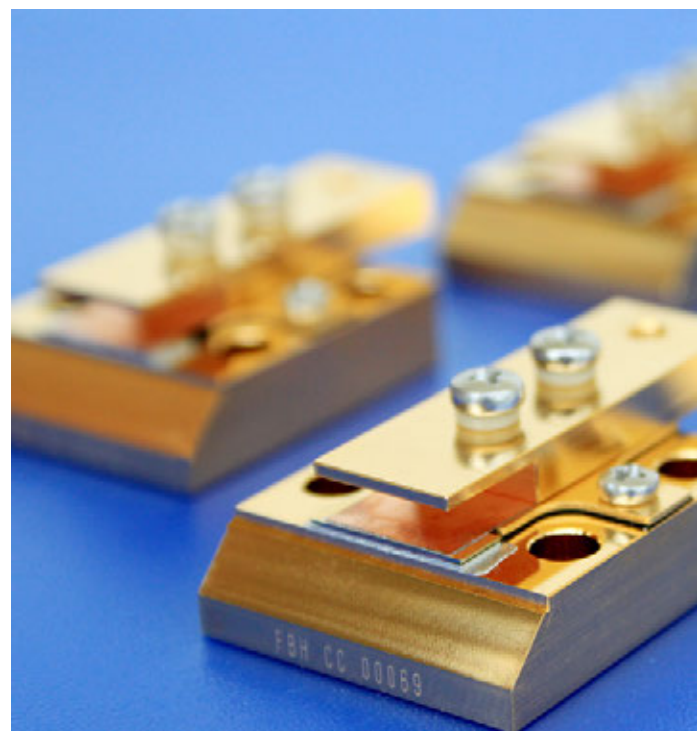
Prof. Markus Aspelmeyer von der TU Wien zusammen. Ansatzpunkt sind die optischen Beschichtungen, die üblicherweise auf  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  basieren. Diese bieten zwar sehr hohe Reflektivitäten, jedoch führen ihre Gitterschwingungen zu Verlusten und tragen wesentlich zum Rauschen in optischen Systemen bei. Eine vielversprechende Alternative könnten einkristalline Bragg-Spiegel auf Basis von AlGaAs-Vielschichtstrukturen sein. Das Materialsystem bietet geringes Phasenrauschen und könnte die existierenden Schichtsysteme für Hochpräzisions-Interferometrie ablösen. Im Projekt werden die Grenzen dieses Materialsystems in Bezug auf optische und mechanische Verluste ausgelotet. Darüber hinaus wird ein Prozess entwickelt und untersucht, mit dem sich solche einkristallinen Spiegel auf Saphirträger transferieren und aufaminieren lassen. Dies schließt sogar die Möglichkeit gekrümmter Spiegel ein, die bislang mit kristallinen Materialien nur schwierig zu realisieren sind.

## EINGEWORBEN IM LEIBNIZ-WETTBEWERB: BESONDERS LEISTUNGSFÄHIGE DIODENLASER FÜR DIE ENERGIEGEWINNUNG

Jährlich vergibt die Leibniz-Gemeinschaft im Rahmen des Paktes für Forschung und Innovation rund 30 Millionen Euro an Leibniz-Institute. Diese treten im direkten Wettbewerb um Forschungsmittel an und werden vom Senatsausschuss Wettbewerb (SAW) nach Kriterien wissenschaftlicher Exzellenz bewertet. Auf der Grundlage dieser Empfehlungen entscheidet der Senat der Leibniz-Gemeinschaft, welche Vorhaben gefördert werden.

Auch 2012 war das FBH mit einem Antrag in der Förderlinie „Innovative Vorhaben“ erfolgreich. Die Vorhaben in dieser Förderlinie untersuchen Fragestellungen jenseits der etablierten Paradigmen und müssen wissenschaftliche, technische oder organisatorische beziehungsweise strukturelle Fortschritte versprechen. Das kürzlich gestartete FBH-Projekt „Cryogenic Diode Lasers“ untersucht das Potenzial von Diodenlasern bei Temperaturen von bis zu  $-80^\circ\text{C}$ . Bei diesen sehr niedrigen Temperaturen werden eine höhere Effizienz und deutlich mehr Leistung pro Chipfläche erwartet. Dies würde den Einsatz von Diodenlasern in künftigen Laseranlagen, wie etwa in Röntgenlasern oder Anlagen zur lasergesteuerten Fusion zur Energiegewinnung, ermöglichen. Damit wäre eine  $\text{CO}_2$ -neutrale Form der Energiegewinnung auch unter ökonomischen Gesichtspunkten möglich.

Die Arbeitsschwerpunkte im Projekt liegen auf dem Design und der Charakterisierung der auf diesen Temperaturbereich angepassten epitaktischen Laserstrukturen. Dabei soll pro Zentimeter Barrenlänge 1,6 kW Leistung erreicht werden, das ist fast das Doppelte der bisher veröffentlichten Spitzenleistungen. Zugleich soll der elektro-optische Wirkungsgrad um 20 % auf 80 bis 90 % gesteigert werden. Im Rahmen des Projektes soll die Kooperation zu den europäischen und US-amerikanischen Forschungszentralen für die lasergesteuerte Fusion HiPer (High Power Laser Energy Research am STFC Rutherford Appleton Laboratory, UK) und LIFE (Laser Inertial Fusion Energy am Lawrence Livermore National Laboratory, USA) ausgebaut werden.





The project named "low noise crystalline mirrors for precision metrology" is funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) and brings together the teams of Dr. Markus Weyers from the FBH, Prof. Achim Peters from the Humboldt-Universität zu Berlin, and Prof. Markus Aspelmeyer from TU Vienna. Starting point are optical coatings which usually base on  $Ta_2O_5/SiO_2$ . This coating offers very high reflectivity but also lattice vibrations, which lead to losses and significantly contribute to noise in optical systems. Monocrystalline Bragg mirrors based on AlGaAs multilayer structures might be a promising alternative. The materials system offers low phase noise and could replace existing layer systems used for precision interferometry. Within the project, the limits of this materials system regarding optical and mechanical losses are explored. A process shall be additionally developed and examined, allowing to transfer and laminate such monocrystalline mirrors onto sapphire carriers. Even curved mirrors are an option, which are so far very difficult to realize with crystalline materials.

## SUCCESSFUL WITH COMPETITIVELY RAISED FUNDS: SPECIFICALLY CAPABLE DIODE LASERS FOR ENERGY GENERATION

Every year, the Leibniz Association competitively distributes public financial resources of around 30 million Euros within the frame of Pact for Research and Innovation to Leibniz institutes. Research funds are evaluated according to criteria of scientific excellence by the Leibniz Senate Competition Committee (SAW). Based on these recommendations, the Senate of the Leibniz Association decides about which proposals shall be financed.

In 2012, the FBH was once more successful with an application in the "innovative projects" field. This funding line promotes projects investigating research and service directions that look beyond established paradigms. The proposals funded should hold the promise of culminating in scientific, technical or organizational/structural progress. Accordingly, the recently started FBH project "Cryogenic Diode Lasers" examines the potential of diode lasers

at temperatures of up to  $-80^\circ\text{C}$ . It is expected to receive higher efficiency and significantly more output power per chip area at such extremely low temperatures. This would pave the way for application of diode lasers in future laser large-scale plants such as X-ray lasers and plants for laser-induced fusion used for energy generation. Thus, a  $\text{CO}_2$  neutral form to produce energy would be possible, even under economic aspects.

The work packages within the projects are on design and characterization of the epitaxial laser structures optimized for the low temperature range. 1.6 kW output power per centimeter bar length is the aim along with increasing the electro-optical conversion efficiency by 20 % to 80 to 90 %. During the project, cooperation with the European and US-American research centers for laser-induced fusion HiPer (High Power Laser Energy Research at STFC Rutherford Appleton Laboratory, UK) and LIFE (Laser Inertial Fusion Energy at Lawrence Livermore National Laboratory, USA) shall be extended.



◀ *Cryogenic Diode Lasers – hohe Leistungen bei niedrigen Temperaturen.*  
*Cryogenic Diode Lasers—high output powers at low temperatures.*

## TOP-INFRASTRUKTUR FÜR EXZELLENT FORSCHUNG

Auch im vergangenen Jahr hat das FBH seine technische Infrastruktur wieder auf den neuesten Stand gebracht – drei Jahre zuvor waren bereits die Klima- und Reinraumtechnik umfassend erneuert worden. Damit sichert sich das FBH seine exzellente technische Infrastruktur, die weiterhin State-of-the-Art-Entwicklungen ermöglicht. Neben einem neuen Lackprozessor, einem Partikelmonitor und einem Benzocyclobuten-Ofen wurde insbesondere ein neuer Waferstepper angeschafft. Dieses Großgerät ist eine der zentralen Anlagen bei der Prozessierung komplexer Halbleiter-Bauelemente und ermöglicht fotolithografische Strukturierungen. Die Belichtung der Wafer ist dabei in mehreren gleichen Schritten mit einer Maske möglich. Wie das Vorgängermodell erlaubt das neue Gerät die vollautomatische Belichtung von 2-Zoll-, 3-Zoll- und 4-Zoll-Wafern, bietet aber eine bessere Abbildungsgenauigkeit und ermöglicht kleinere Strukturen.

Für die Installation der neuen Anlage waren größere Umbauten im Reinraum erforderlich. Der Reinraumbetrieb war teils eingestellt. Die Ausfallzeiten konnten jedoch durch mehrwöchige Samstags- und Mehrarbeit ausgeglichen werden, sodass es zu keinen Verzögerungen in den Projekten und bei der Auftragsabwicklung kam.

Auch das im Jahr zuvor neu installierte hochauflösende Analytik-Tool zur Charakterisierung von Degradationsprozessen wurde 2012 in Betrieb genommen. Das leistungsfähige Gerät erweitert die Möglichkeiten zur Charakterisierung von Halbleiterschichtstrukturen und Bauelementen deutlich. Die Inbetriebnahme eines Kathodolumineszenz-Systems ermöglicht spektrale Mappings vom UV-C-Bereich bis ins Infrarot bei 80 K. Dadurch können die optischen Eigenschaften neuartiger Schichtstrukturen, die durch laterales Wachstum erzeugt werden, mit einer hohen spektralen und lateralen Auflösung untersucht werden. In Kombination mit Elementverteilungsbildern und der quantitativen Bestimmung der lokalen Zusammensetzung der Schichten mithilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie geben diese Untersuchungen Aufschluss über die Wachstumsmechanismen. Durch die Erweiterung des Spektralbereichs können nun auch die Ausfallursachen von LEDs und Lasern im UV-Bereich untersucht werden. Auch die elektrischen Eigenschaften von Bauelementen lassen sich durch das Abtasten mit dem Elektronenstrahl und die dadurch erzeugten Ströme mit hoher Ortsauflösung bestimmen.

## DER SCHLÜSSEL ZUM ERFOLG: QUALIFIZIERTE UND MOTIVIERTE MITARBEITER

Qualifikation und Motivation des wissenschaftlichen und technischen Personals sind entscheidende Kriterien für den Erfolg einer Forschungseinrichtung wie des Ferdinand-Braun-Instituts. Das FBH macht daher zahlreiche Angebote, sowohl zur Vereinbarkeit von Familie und Beruf, als auch zur weiteren Qualifikation der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Zusätzlich zu klassischen Weiterbildungsmaßnahmen wie Sprachkursen oder Workshops zu Selbstorganisation und Präsentationstechniken hat das FBH auch im vergangenen Jahr wieder einen Kollegen auf angehende Leitungsaufgaben durch ein Führungskräfte-Training vorbereitet. Mehr als zehn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des FBH engagieren sich an Berliner und Brandenburger Hochschulen bei der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses; weitere Kolleginnen und Kollegen führen Sommerschulen und Doktorandenworkshops durch.

Die Abteilung Wissenschaftsmanagement des FBH organisierte im Juni erstmalig das zweitägige Doktorandenforum der Sektion D der Leibniz-Gemeinschaft – dazu gehört auch das FBH sowie alle weiteren natur- und ingenieurwissenschaftlichen Institute innerhalb der

## TOP INFRASTRUCTURE FOR EXCELLENT RESEARCH

Up-to-date equipment and technical infrastructure is an important premise enabling FBH to further develop state-of-the-art devices. Thus, the FBH constantly updates its technical infrastructure—extensive modernizations were carried out regarding the air-conditioning systems and cleanroom technology three years before. In 2012, apart from a novel coating processor, a particle monitor, and a benzocyclobutene oven, one of the main acquisitions was a new wafer stepper. This large-scale equipment is one of the key tools required to process complex semiconductor devices and is used for photolithographic structuring. With it, exposure of wafers is possible in several identical steps with one mask. Like the preceding model, the novel equipment allows fully automatic exposure of 2-, 3-, and 4-inch wafers but offers improved reproduction accuracy and enables smaller structures.

The installation works related to the new equipment lead to comprehensive modifications within the FBH infrastructure. Thus, cleanroom operation was partly stopped, but downtime could be compensated by additional work during Saturdays and overtime over several weeks. As a result, neither projects nor processing of orders had to suffer from any delay.

In 2012, the high-resolution analytics equipment for characterization of degradation processes, which had been installed the year before, was put into operation. The capable tool significantly enhances the possibilities for characterization of semiconductor structures and devices. Implementing a cathodoluminescence system enables spectral mappings from the UV-C up to the infrared spectral range at 80 K. Thus, optical properties of novel layer structures, which were produced by lateral growth, can be examined with a high spectral and lateral resolution. Combined with quantitative determination and mapping of the local composition by means of energy-dispersive X-ray spectroscopy, such examinations deliver precise information on failure mechanisms. Extending the spectral range, enables FBH now to investigate failure causes of LEDs and lasers also in the UV range. Moreover, the electrical properties of devices can be determined with high spatial resolution by electron beam scanning



▲ Anlieferung des neuen Wafersteppers für den FBH-Reinraum.

Delivery of the new wafer stepper for the FBH cleanroom.

## THE KEY TO SUCCESS: QUALIFIED AND MOTIVATED EMPLOYEES

Qualification and motivation of the scientific as well as the technical personnel are a decisive factor for success for research institutions like the Ferdinand-Braun-Institut. Thus, FBH provides many offers to reconcile work and family life and for further qualification of its employees. In addition to standard advanced trainings, such as language courses and workshops aiming to improve self-organization and presentation skills, the FBH prepared last year once more a colleague for future executive function by a leadership training program. It should also be added that more than ten scientists from the FBH are involved in educating the scientific offspring at Berlin and Brandenburg universities; further colleagues are organizing as well as actively contributing to summer schools and PhD workshops.

In summer, the Science Management Department at FBH organized the first two-day PhD forum for Section D of the Leibniz Association—to which belongs the FBH like all other mathematics, natural sciences, and engineering institutes affiliated within the research association. A follow-up event is already being prepared for 2013. The ZEMI Summer School was also

Wissenschaftsorganisation. Eine Folgeveranstaltung für 2013 ist bereits in Vorbereitung. Auch die ZEMI-Sommeruni, die gleichfalls von der Abteilung organisiert wurde, bot umfassende Gelegenheiten zum Netzwerken und Informationsaustausch. Die 5-tägige Weiterbildungsveranstaltung informierte im August über aktuelle Trends und Entwicklungen aus der Mikrosystemtechnik an verschiedenen Berliner Forschungseinrichtungen – an einem Tag gestaltete das FBH das Programm zu Hochleistungsdiodenlasern.

Auch bei berufsbegleitenden Studien unterstützt das Institut bedarfsgerecht engagierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, und das sogar grenzübergreifend. So qualifiziert sich ein Kollege an der TU Oppeln (PL) in einem zweijährigen Masterstudium im Bereich der Automatisierungstechnik. Das gleiche Fachgebiet studiert eine am FBH ausgebildete Mikrotechnologin dreieinhalb Jahre lang an der staatlichen Fachhochschule Ratibor (PL). Das Institut berücksichtigt deren Abwesenheiten aufgrund von Vorlesungen bei der Arbeitsplanung und bezuschusst die Fahrtkosten.

### **Technische Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – unverzichtbar im Reinraumbetrieb**

Geht es um herausragende Forschungsergebnisse, ist häufig nur von akademischer Exzellenz die Rede. Dabei sind am FBH knapp ein Fünftel der gesamten Belegschaft technische Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Sie arbeiten Hand in Hand mit dem wissenschaftlichen Personal und sorgen für die termin- und fachgerechte Durchführung der Prozesse. Von der Material- und Prozesstechnologie bis hin zur Aufbau- und Messtechnik sind sie für viele Abläufe unverzichtbar. Ihre Qualifikationen reichen vom Lehrberuf – meist aus der Mikrotechnologie – über Weiterbildungen zum/zur Techniker/-in bis hin zum abgeschlossenen Studium. Hinzu kommen weitere elf Kolleginnen und Kollegen, die in den technischen Diensten für den störungsfreien Betrieb der technischen Infrastruktur sorgen – mit einem breit gefächerten Aufgabenspektrum, von der institutseigenen Werkstatt über die Energieversorgung und Haustechnik bis hin zur Klima- und Reinraumtechnik.

Einige der technischen Kolleginnen und Kollegen tragen im Laborbetrieb als Schichtleiter zusätzliche Verantwortung: Steffen Breuer, Gabriele Hamma, Stefan Hochheim, Karina Ickert, Dirk Rentner und Daniel Schauer organisieren eigenständig den reibungslosen Arbeitsablauf in den Reinraumlaboren. Diese Technikerinnen und Techniker übernehmen hoch spezialisierte Aufgaben, die den Betrieb der komplexen technischen Anlagen sichern. Die meisten haben sich für ihre Aufgaben durch spezielle Schulungen und Weiterbildungen oder ein berufsbegleitendes Studium qualifiziert. Viele sorgen als Anlagenverantwortliche für deren Service, führen selbst kleine Wartungen durch und weisen Nutzer ein. So ist beispielsweise Alexander Külberg als technischer Anlagenverantwortlicher für den Ionenimplanter auch der Strahlenschutzbeauftragte des FBH. In der Materialtechnologie ist Olaf Fink für die Versorgung mit den hochreinen Gasen für die Epitaxie verantwortlich. Er stellt dabei nicht nur sicher, dass alle für die Epitaxie und Prozessierung notwendigen Gase zur Verfügung stehen, sondern organisiert auch den Wechsel der Gasflaschen mit minimaler Unterbrechung des Laborbetriebs. Daneben kümmert er sich um das Gasverteilungssystem und die Sicherheitstechnik. Dazu gehört auch die Atemschutzausrüstung, für die er als Atemschutzbeauftragter zuständig ist. Stefan Hochheim ist sowohl für die rechtzeitige Bestellung und Ausgabe benötigter Chemikalien mitverantwortlich, als auch besonders engagiert bei der Entwicklung innovativer Prozesse, wie der Transfersubstrat-Technologie. Damit hilft er, einen explorativen Prozess weiter zu entwickeln, mit dem die FBH-Bauelemente für den Terahertzbereich hergestellt werden. Im Bereich der Materialanalytik zeichnet sich Helen Lawrenz durch ihre Vielseitigkeit aus; ihre Aufgaben reichen von Photolumineszenz-Messungen über Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen bis hin zur vorbereitenden Probenpräparation. Derartige analytische Untersuchungen sind unverzichtbare Werkzeuge für die Qualitätssicherung in der Bauelemententwicklung. Insbesondere bei der Epitaxie der Strukturen müssen die Schichteigenschaften permanent überwacht werden. Die Analyse von Bauelementen auf Ausfallursachen hilft bei der Weiterentwicklung von Bauelementstrukturen und -prozessen. In der Messtechnik wiederum

organized by the department offering comprehensive possibilities for networking and information exchange. The five-day further training event informed the participants about current trends and developments in microsystems technology at various Berlin research institutes. One day was arranged by FBH offering a program on high-power diode lasers.

Extra occupational studies were another issue at which the institute supported interested colleagues, even across national borders: One team member further qualifies himself at TU Oppeln (Poland) with a two-year master program in automation engineering. The same subject studies a colleague at Ratibor University for Applied Sciences (Poland). She had already completed an apprenticeship as microtechnologist at FBH before. The institute supports both staff members by considering their absences due to lectures in work scheduling and by subsidizing travel costs.



### Technical staff—essential for cleanroom operation

If it is about outstanding research results, one often only thinks about academic excellence. However, at FBH almost one fifth of the whole team is technical staff, working hand in hand with the scientists and thus ensuring professional completion of processes in due time. From materials and process technology to packaging and measurements, they are indispensable for various kinds of internal operations. Their qualification ranges from vocational education, usually microtechnologists, further training as technicians to full academic qualification. Another eleven colleagues form the technical services unit that safeguards frictionless operation of the technical infrastructure. This team covers a broad range of tasks including the institute's workshop, power supply, domestic engineering, and air-conditioning and cleanroom technology.

Some of the technical staff members are additionally responsible for the smooth laboratory operation as shift supervisors, namely Steffen Breuer, Gabriele Hamma, Stefan Hochheim, Karina Ickert, Dirk Rentner, and Daniel Schauer. These colleagues autonomously organize the workflow in the cleanroom laboratories and take over highly specialized tasks thus ensuring effective operation of the complex technical infrastructure. Most of them qualified for their tasks by specific trainings, some completed extra occupational studies. Many are in charge of highly specialized technical equipment and the respective services, and additionally conduct minor maintenance works and instruct new users. Alexander Külberg, for example, is the responsible technician for the ion implanter and FBH's radiation protection officer in addition. In the Materials Technology Department, Olaf Fink ensures constant supply with ultra-pure process gases by providing the necessary gases used for epitaxy and further processes. He additionally organizes the exchange of gas bottles with shortest possible interruption of laboratory operation and is also in charge of the gas distribution system and safety engineering including respiratory protective equipment. Stefan Hochheim is co-responsible for timely ordering and providing required chemicals for process technology. He is also particularly involved in the development of innovative processes like the transfer-substrate technology. Thus, he assists to further develop an explorative process that is used to produce FBH devices in the terahertz range. In the field of materials analytics, Helen Lawrenz stands out by her versatility with manifold tasks ranging from photoluminescence measurements, scanning electron microscopy to sample preparation. Such analyses are indispensable tools ensuring the quality in device development. Especially during epitaxial processes of the structures, layer properties need to be monitored constantly. An extensive study of failure causes of the devices helps to advance device structures and processes. Further colleagues like Steffen

▲ *Damit es rund läuft: Die technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des FBH sorgen für reibungslose Abläufe am Institut.*

*Ensuring that everything runs smoothly—FBH's technical staff takes care of frictionless processes at the institute.*

entwickeln Kollegen wie Steffen Schulz oder Lars Schellhase Messplätze in der Hochfrequenz-beziehungsweise Hochspannungsmesstechnik weiter.

Andere Mitarbeiter bringen spezielle Kenntnisse und Erfahrungen mit. Dazu gehört Steffen Breuer als Mitglied der Freiwilligen Feuerwehr, der die Schulungen zur Arbeitssicherheit mit seiner Kompetenz beim Brandschutz unterstützt. Weitere spezifische Aufgaben, von der Edelmetall-Bestellung bis hin zur Arbeitssicherheit, werden eigenverantwortlich von technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern durchgeführt – sie alle sichern mit ihrer Arbeit die reibungslosen Abläufe innerhalb der überaus komplexen Prozesskette am FBH. Durch die eng vernetzte Arbeitsweise, muss jeder einzelne Arbeitsschritt problemlos funktionieren, damit in den Projekten und Industrieaufträgen keine zeitlichen Verzögerungen entstehen. Und dafür sorgen, wie diese Beispiele zeigen, zu einem ganz wesentlichen Teil die Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den technischen Bereichen.

Viele dieser Kolleginnen und Kollegen am FBH haben bereits ihre Mikrotechnologie-Ausbildung am Institut absolviert und bilden nun ihrerseits den technischen Nachwuchs mit aus. Nicht umsonst kümmert sich Marlies Gielow als technische Mitarbeiterin in der Epitaxie zusätzlich um die Betriebsdurchläufe in der gewerblichen Mikrotechnologie-Ausbildung. Sie ist zudem Vorsitzende des IHK-Prüfungsausschusses für Mikrotechnologen/-innen in Berlin. Jährlich machen am FBH drei Auszubildende ihren Berufsabschluss. Eine überaus erfreuliche Bestätigung für alle Beteiligten ist es, wenn besonders engagierte Azubis die Abschlussprüfung bereits nach zweieinhalb Jahren vorzeitig erfolgreich ablegen, wie zuletzt Mandy Holländer. Sie wurde anschließend direkt übernommen und trägt nun als qualifizierte Mitarbeiterin weiter zu den Ergebnissen am Institut bei.

Zur Nachwuchs-Qualifizierung gehören übrigens auch die Aktivitäten im Rahmen des gemeinsamen Schülerlabors MicroLAB mit der Lise-Meitner-Schule, um die sich Karina Ickert, Daniel Schauer, Saskia Schönfeld und Jessica Behrchen ganz besonders intensiv kümmern. Dabei zeigen sie interessierten Jugendlichen anhand praktischer Experimente einen der zentralen Prozesse bei der Halbleiterstrukturierung, die Fotolithografie. Anschließend bekommen die Schülerinnen und Schüler im Rahmen einer Institutsführung Einblicke in die wissenschaftlichen Prozesse am FBH. So werden naturwissenschaftliche Kenntnisse anschaulich, lebendig und praxisnah vermittelt – damit sich auch künftig genügend Nachwuchs für den MINT-Bereich und damit für eine Karriere in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik begeistert.

## MESSEN / VERANSTALTUNGEN

Wie in den vergangenen Jahren auch präsentierte sich das Ferdinand-Braun-Institut auf verschiedenen Fachmessen und Kongressen. Im Mittelpunkt der Präsentation auf der Messe Laser Optics Berlin / microsys stand der Wachstumskern ‚Berlin WideBaSe‘ – die Abteilung Wissenschaftsmanagement, die das Netzwerk auch koordiniert, organisierte den begleitenden „German-Polish Workshop on Nitride-Semiconductors“. Rund 3.000 Fachbesucher aus dem In- und Ausland besuchten die Messe mit dem angeschlossenen Kongress der Optical Society (OSA). Auf der begleitenden microsys-Konferenz waren Wissenschaftler des FBH mit fünf Vorträgen, zwei Chair-Sitzungen und einem Impulsvortrag vertreten.

Auch auf einer der international führenden Fachmesse für die Optischen Technologien, der Photonics West in San Francisco, USA, präsentierte das FBH seine Kompetenzen und Neuentwicklungen im Bereich der Diodenlaser. Das Institut war mit zehn Beiträgen von FBH-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeitern als Erstautoren und weiteren fünf als Koautoren vertreten. Darüber hinaus wurden Ergebnisse in verschiedenen externen Beiträgen zitiert.

Schulz and Lars Schellhase possess specialized know-how in measurement technology and are hence refining setups for high-frequency and high-voltage measurements.

Members of the technical staff also contribute with their expert knowledge and experiences gained outside the institute. Steffen Breuer, being a member of the volunteer fire department, for example, supports the FBH with his know-how on fire safety and training sessions with regard to occupational safety. Further specific tasks, from noble metal ordering to occupational safety, are carried out autonomously by technical staff thus securing the smooth workflow within the highly complex process chain at FBH. These examples underline the importance of technical team members for the FBH. Due to closely intertwined working steps, every single one has to go smoothly, preventing time delay within projects and order processing.

Quite a few of these colleagues have already completed their vocational training as micro-technologists at the institute and educate now the technical offspring by themselves. It is not for nothing that Marlies Gielow, working as technical team member in epitaxy, is responsible for internal organization of the vocational training at FBH. Moreover, she is chairperson of the board of examiners for microtechnologists at IHK Berlin. Three apprentices complete their vocational training every year. Marlies Gielow finds it particularly acknowledging if dedicated trainees pass the final exam ahead of time, like most recently Mandy Holländer after two and a half instead of three years. She has been taken over directly into a regular employment position and now further contributes as qualified staff member to the outcome of the institute.

Qualification of young talents includes the activities within the school laboratory MicroLAB, which is operated jointly by FBH and Lise-Meitner-Schule. Karina Ickert, Daniel Schauer, Saskia Schönfeld and Jessica Behrchen intensively train interested young people by conducting practical photolithography experiments, which is one of the core processes in semiconductor structuring. Students subsequently gain an insight-view into scientific processes at FBH within the frame of a tour through the institute. Thus, natural sciences know-how is imparted vividly and practically relevant—aiming to inspire young talents to opt for a career in mathematics, informatics, sciences, and engineering.

## FAIRS / EVENTS

Like in previous years, the Ferdinand-Braun-Institut presented its results and expertise at various trade fairs and congresses. The main focus of exhibition at 2012's Laser Optics Berlin / microsystech fair was on the growth core 'Berlin WideBaSe'—the Science Management Department, who is also coordinating the network, organized the accompanying "German-Polish Workshop on Nitride-Semiconductors". Around 3,000 attendees from all over the world visited the trade fair with affiliated Optical Society (OSA) congress. The FBH also participated at the microsystech conference with five talks, two chair sessions and one keynote speech.

Above all, FBH presented its competencies and new developments in the field of diode lasers on one of the world-leading trade fairs for optical technologies, the Photonics West in

▼ *Eröffnungspressekonferenz Laser Optics Berlin 2012 (v.l.n.r.): Adolf M. Kopp (TSB Innovationsagentur Berlin), Nicolas Zimmer (damals Wirtschafts-Staatssekretär), Thomas Elsässer, (Max-Born-Institut), Maciej Fijałkowski (European Funds Department Warschau), Günter Tränkle (Clustersprecher Optik).*

*Opening press conference Laser Optics Berlin 2012 (f.l.t.r.): Adolf M. Kopp (TSB Innovationsagentur Berlin), Nicolas Zimmer (at that time Berlin State Secretary), Thomas Elsässer, (Max-Born-Institut), Maciej Fijałkowski (European Funds Department Warsaw), Günter Tränkle (Speaker Optics Cluster).*



### FBH zeigt Präsenz auf der IEEE-Photonics Sommerschule

Die IEEE-Photonics Sommerschule in Seattle, Washington in den USA fand 2012 unter starker Beteiligung des FBH statt. Paul Crump war sowohl als Co-Chair aktiv, als auch mit einem eingeladenen Vortrag im Schwerpunkt „High Power Semiconductor Lasers“ vertreten. Neben einem weiteren Kollegen, der einen eingeladenen Vortrag präsentierte, hielt Abteilungsleiter Götz Erbert einen Keynote-Vortrag.

## AUSZEICHNUNGEN / PERSONALIA

### Transferpreis WissensWerte an FBH-Team verliehen

Im Rahmen der Berliner Fachmesse Laser Optics Berlin / microsys 2012 wurde einem sechsköpfigen Team des FBH der Transferpreis WissensWerte verliehen (ausführliche Meldung siehe S. 20). Der Preis wird vom Förderverein der Technologiestiftung Berlin vergeben und ist mit 50.000 Euro dotiert. Er würdigt den nachhaltigen Transfer von besonders leistungsfähigen Diodenlasern für die Materialbearbeitung.

### Chorafas-Preis 2012 geht an Jens Raß

FBH-Nachwuchswissenschaftler Jens Christian Raß wurde mit dem Chorafas-Preis 2012 für seine Doktorarbeit auf dem Gebiet Festkörperphysik ausgezeichnet. Seine Arbeit „Charakterisierung von InGaN-basierten Lichtemittern auf semipolaren und nichtpolaren Halbleiteroberflächen“ entstand im Rahmen der Forschungskooperation von FBH und TU Berlin. Sie wurde betreut von TU-Professor Michael Kneissl, der am FBH zudem den Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik leitet. Die Chorafas-Stiftung zeichnet jährlich international Promovenden beziehungsweise Promovierte für überdurchschnittliche Forschungsarbeiten aus. Ziel ist die Förderung junger, herausragender Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die mit einem Startkapital für postgraduierte Forschungen ausgestattet werden sollen: 2.000 US-Dollar erhielt Jens Christian Raß als einer von drei Preisträgern.

▼ Wolfgang Heinrich bei der Eröffnungsveranstaltung der European Microwave Week 2012.

Wolfgang Heinrich at the opening ceremony of European Microwave Week 2012.

### Wolfgang Heinrich als Präsident der EuMA wiedergewählt

Zum Januar 2012 übernahm Wolfgang Heinrich, Abteilungsleiter für Mikrowellentechnik am FBH, für weitere drei Jahre die Präsidentschaft der European Microwave Association (EuMA). Die EuMA gilt als einer der international einflussreichsten Zusammenschlüsse von Wissenschaftlern und Ingenieuren in der Mikrowellentechnik. Sie veranstaltet jährlich die European Microwave Week – eine der weltweit wichtigsten Mikrowellenkonferenzen.



## BEST PAPER AWARDS

### He Bong Kim Best Paper Award (CS-MANTECH)

Im April 2012 wurde auf der CS-MANTECH-Konferenz in Boston, USA, der Preis für die beste Publikation und Präsentation 2011 an ein Team des Ferdinand-Braun-Instituts überreicht. Ausgezeichnet wurde die Veröffentlichung von S. Chevchenko, P. Kurpas, N. Chaturvedi, R. Lossy und J. Würfl: „Investigation and Reduction of Leakage Current Associated with Dielectric Gate Encapsulation in AlGaIn/GaN HEMTs“. Die CS-MANTECH ist die weltweit renommierteste Konferenz im Zusammenhang mit der Prozessierung von III/V-Halbleitern.



San Francisco, USA. FBH scientists represented the institute and its developments with ten conference contributions as lead authors and another five as co-authors. Further results were quoted in various external contributions.

### **FBH strongly represented at IEEE-Photonics Summer School**

In 2012, the IEEE-Photonics Summer School took place in Seattle, Washington, USA, with strong FBH presence: Paul Crump was actively involved as co-chair and held an invited talk in the key area "High Power Semiconductor Lasers". Another FBH colleague presented an invited talk and Götz Erbert, the Head of the Optoelectronics Department, held a keynote speech.

## **AWARDS / PERSONAL PARTICULARS**

### **Transfer prize WissensWerte awarded to FBH team**

During the Berlin trade fair Laser Optics Berlin / microsystech 2012, an FBH team was awarded with the transfer prize WissensWerte (see also detailed information p. 21). The prize is endowed with 50,000 Euro and assigned by the friends of the Technology Foundation Berlin (TSB). It acknowledges the sustainable transfer of research results concerning extraordinarily powerful diode lasers to be applied in materials processing.

### **Chorafas award 2012 goes to Jens Raß**

FBH junior scientist Jens Christian Raß was awarded with the Chorafas prize 2012 for his PhD thesis "characterization of InGaN-based light emitters on semi-polar and non-polar semiconductor surfaces" that was written within the frame of the research cooperation of FBH and TU Berlin. The thesis was supervised by TU professor Michael Kneissl, who is also Head of the Business Area GaN Optoelectronics at FBH. The Chorafas foundation honors graduating as well as already graduated students for superior research results. Aim is to promote young and especially talented scientists and provide them with seed money for post-graduate research. Jens Christian Raß received 2,000 Dollar US as one of all in all three awardees.

### **Wolfgang Heinrich re-elected EuMA president**

As of January 2012, Wolfgang Heinrich, Head of FBH's Microwave Department, took over the presidency of the European Microwave Association (EuMA) for another three-year period. EuMA is considered to be one of the internationally most important associations for scientists and engineers within microwave technology. The non-profit association organizes the yearly European Microwave Week—one of the major microwave conferences world-wide.

## **BEST PAPER AWARDS**

### **He Bong Kim Best Paper Award (CS-MANTECH)**

In April 2012, "Investigation and Reduction of Leakage Current Associated with Dielectric Gate Encapsulation in AlGaN/GaN HEMTs" released by S. Chevchenko, P. Kurpas, N. Chaturvedi, R. Lossy, and J. Würfl was estimated to be the best publication and presentation published in 2011. The award was handed over to the team from the Ferdinand-Braun-Institut at CS-MANTECH in Boston, USA. CS-MANTECH is the world-wide most prestigious conference regarding processing of III-V semiconductors.



### GeMiC 2012 Best Paper Award

Die Auszeichnung für die beste Veröffentlichung der German Microwave Conference GeMiC 2012 ging an zwei Publikationen. Eine davon war die Veröffentlichung der FBH-Wissenschaftler R. Perea-Tamayo, O. Bengtsson, P. Landin (University of Gävle, Sweden) und W. Heinrich mit dem Titel „A Modular Hybrid Switching Amplifier for Wide-Bandwidth Supply-Modulated RF Power Amplifiers“. Sie wurde unter 140 eingereichten und 100 akzeptierten Arbeiten in einem strengen Peer-Review-Prozess (vier Begutachtungen pro Paper) ausgewählt. Die Publikation basiert auf der Masterarbeit von Robert Perea-Tamayo, die von Olof Bengtsson am FBH betreut wurde.

### ESREF 2012 Best Paper Award

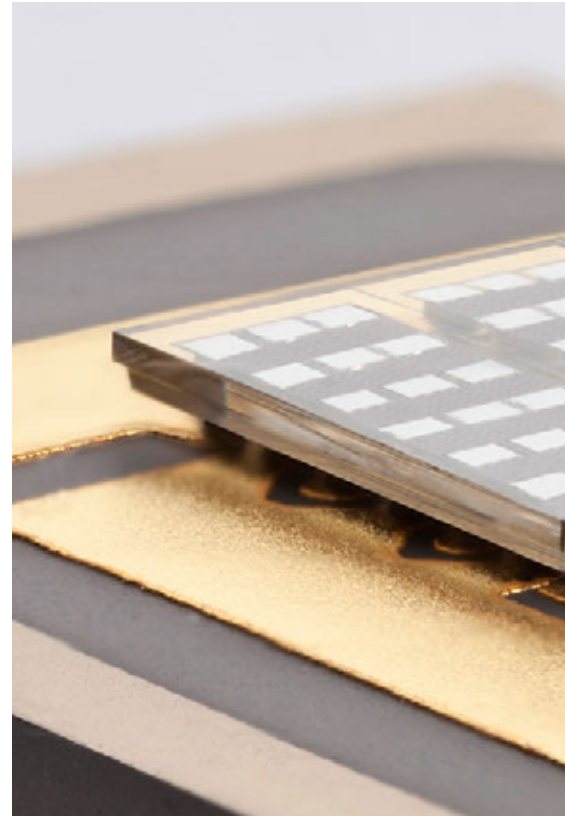
Die Publikation von A. Zanandrea, E. Bahat-Treidel, F. Rampazzo, A. Stocco, M. Meneghini, E. Zanoni, O. Hilt, P. Ivo, J. Wuerfl, G. Meneghesso, „Single and double-heterostructure GaN-HEMTs devices for power switching applications“ wurde mit dem „Best Paper Award 2012“ der ESREF-Konferenz 2012 ausgezeichnet. Die Autoren stammen von der Universität Padua, dem Ferdinand-Braun-Institut und vom Nano-Electronics-Team italienischer Universitäten.

### FBH-GaN-Transistoren als Referenz für Anbieter von Simulationssoftware

Bereits zum zweiten Mal nutzte einer der führenden Anbieter von Simulationssoftware eine FBH-Publikation zu seinen p-GaN-Gate GaN-Transistoren als Referenz. Nach dem Softwarehaus Synopsys präsentierte nun Silvaco ein Simulationsmodul, das einen selbstsperrenden GaN-Transistor beschreiben kann, der mit p-GaN-Gate-Technologie realisiert wurde. Das Modell bildet die experimentellen Kennlinien nach, die das FBH 2010 auf der ISPSD in Hiroshima veröffentlichte. Diese Aktivitäten bestätigen die große Nachfrage nach dieser Transistortechnologie.

► *Selbstsperrender Leistungstransistor in p-GaN-Gate-Technologie.*

*Normally-off power transistor in p-GaN gate technology.*



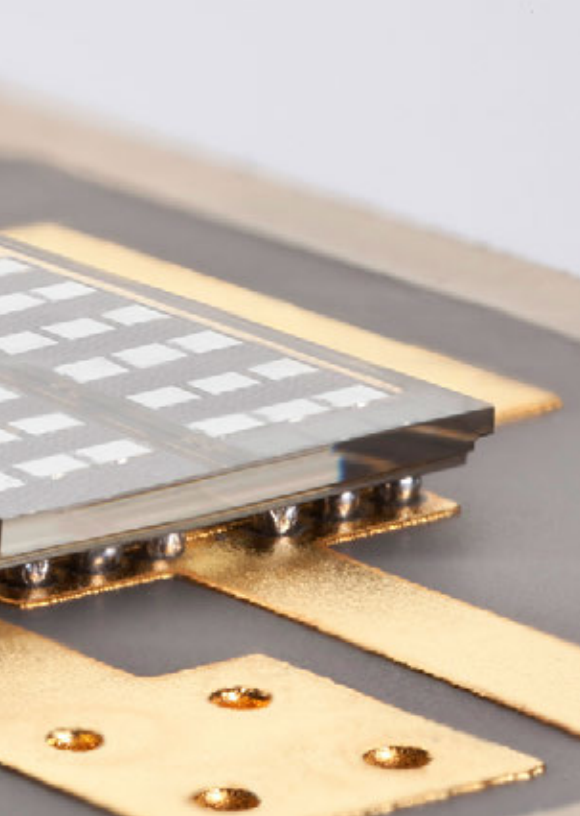
## VORBILDLICHER UMWELTSCHUTZ & GEFÄHRSTOFFE GUT BEHERRSCHT

Das FBH betreibt eine Abwasseraufbereitungsanlage, die verhindert, dass Chemikalien in die Umwelt gelangen. Deren Betrieb wurde nun vom Bezirksamt Treptow-Köpenick für weitere fünf Jahre genehmigt. Die Anlage neutralisiert die Laborabwässer und reinigt sie von Partikeln sowie Arsenrückständen, ehe sie der öffentlichen Kanalisation zugeführt werden. Prüfungen haben ergeben, dass die Arsenrückstände etwa 0,01–0,02 mg/l betragen, dies entspricht weniger als 10 % des gesetzlich festgelegten Grenzwerts von 0,20 mg/l.

Der sichere Umgang mit toxischen Gasen sowie das Chemikalienbereitstellungslager werden vom Bezirksamt Steglitz-Zehlendorf geprüft. Dabei wurden in den letzten Jahren sinkende Mengen gefährlicher Stoffe wie etwa Fluorwasserstoffsäure festgestellt; auf Methanol, Benzol oder Brom hat das FBH bewusst ganz verzichtet. Deshalb wird das Bezirksamt künftig nur noch im Zwei-Jahres-Rhythmus vor Ort prüfen. Seit 2007 ist der Themenbereich Umwelt zudem Bestandteil der Jahresaudits zum integrierten Managementsystem.

### GeMiC 2012 Best Paper Award

The award for the best publication of German Microwave Conference GeMiC 2012 went to two publications, among them the one written by FBH scientists R. Perea-Tamayo, O. Bengtsson, P. Landin (University of Gävle, Sweden), and W. Heinrich entitled "A Modular Hybrid Switching Amplifier for Wide-Bandwidth Supply-Modulated RF Power Amplifiers". This publication was selected out of 140 submitted and 100 accepted papers in a strict peer-review process (four reviews per paper). It bases on the master theses of Robert Perea-Tamayo that was supervised by Olof Bengtsson at the FBH.



### ESREF 2012 Best Paper Award

The publication "Single and double-heterostructure GaN-HEMTs devices for power switching applications" by A. Zanandrea, E. Bahat-Treidel, F. Rampazzo, A. Stocco, M. Meneghini, E. Zanoni, O. Hilt, P. Ivo, J. Wuerfl, and G. Meneghesso was awarded with the "Best Paper Award 2012" of ESREF conference 2012. The authors come from the University of Padova, Ferdinand-Braun-Institut, and Italian Universities Nano-Electronics team.

### GaN transistors from the FBH as reference for simulation software suppliers

Already for the second time, one of the leading suppliers of simulation software has used a p-GaN gate transistors publication from the FBH as reference. In addition to the software company Synopsys, Silvaco presented a simulation module capable of describing a normally-off GaN transistor realized in p-GaN gate technology. The model reproduces the experimental characteristics that were published by the FBH at ISPSD, Hiroshima, in 2010. These activities emphasize the great demand for this transistor technology.

## EXEMPLARY ENVIRONMENTAL PROTECTION & WELL-CONTROLLED HAZARDOUS SUBSTANCES

The FBH runs a liquid waste processing system preventing chemicals to find their way into the environment. Operation was approved by the district authority Treptow-Köpenick for another five-year period. The system neutralizes residual water from the laboratory and cleans it from particles as well as from arsenic traces before disposing them into public canalization. Tests revealed that arsenic residues average only around 0.01–0.02 mg/l, which corresponds to less than 10 % of the legally fixed limit of 0.20 mg/l.

Safe handling of toxic gases and the chemical storage are routinely checked by the district authority Steglitz-Zehlendorf. In the last years, a sinking amount of hazardous substances like hydrofluoric acid was observed. In fact, the FBH deliberately relinquished toxic agents including methanol, benzene, and bromine. As a consequence, the district authority will now inspect only every second year on site. Since 2007, environment is additionally part of the annual audit of the integrated management system.

## GLEICHSTELLUNG & FAMILIENFREUNDLICHKEIT

### Total E-Quality Prädikat

Erneut darf das FBH das Total E-Quality Prädikat weitere drei Jahre führen. Erstmals war dieses dem Institut im Juni 2009 für sein Engagement und die gezielten Maßnahmen zur erfolgreichen Umsetzung von Chancengleichheit verliehen worden. Der Aspekt der Chancengleichheit gewinnt nicht nur vor dem Hintergrund der Fachkräftebeschaffung immer mehr an Bedeutung. Er wird auch von Seiten der Zuwendungsgeber zunehmend Kriterium bei der Vergabe von Forschungsgeldern. Nach einem Beschluss der gemeinsamen Wissenschaftskonferenz müssen nun bis 2017 Zielquoten für den Frauenanteil an Forschungseinrichtungen umgesetzt werden. In jeder Qualifikationsstufe soll der Frauenanteil mindestens so hoch sein wie in der Stufe darunter. Das FBH kommt den Vorgaben dieses Kaskadenmodells schon recht nah und will den Frauenanteil weiter ausbauen – insbesondere auch in Führungspositionen.

### Preisverleihung familienfreundlicher Betrieb 2012

Im September wurde das FBH zum vierten Mal als familienfreundlicher Betrieb in Treptow-Köpenick ausgezeichnet. Der Wanderpokal und das Preisgeld wurden vom Bezirksbürgermeister Oliver Igel überreicht. Dieser zeigte sich so interessiert, dass er kurz nach der Preisverleihung das FBH besuchte und dabei die gute Vernetzung mit der regionalen Wirtschaft hervorhob.



### Wiederwahl der Gleichstellungsbeauftragten

Bereits zum vierten Mal in Folge wurde Ute Zeimer 2012 zur Gleichstellungsbeauftragten (GLB) am FBH gewählt. Die promovierte Physikerin und Mutter zweier erwachsener Kinder ist zugleich Sprecherin aller GLB des Forschungsverbundes Berlin e.V. (FVB), zu dem auch das FBH als eines von acht Instituten gehört. Damit ist sie nicht nur Ansprechpartnerin für die FVB-Leitung und ihre Kolleginnen aus den anderen Instituten, sondern sie organisiert auch zusammen mit den anderen GLBs den jährlich stattfindenden Workshop für Doktorandinnen und PostDoktorandinnen. Auf dieser Veranstaltung werden jeweils zehn Wissenschaftlerinnen aus den FVB-Instituten zu „Softskills“ geschult und auf Führungsaufgaben vorbereitet. Über Langeweile kann Ute Zeimer jedenfalls nicht klagen: Neben ihrer Funktion als Gruppenleiterin Materialanalytik am FBH nimmt sie an Einstellungsverfahren teil und unterstützt die Institutsleitung bei der Steigerung des Frauenanteils, insbesondere bei den Doktorandinnen. Als Erfolg verbucht sie, dass es am FBH gelungen ist, den Anteil der Doktorandinnen 2012 auf 27 % zu steigern – obwohl die Absolventinnenzahlen in der Physik nach wie vor unter 20 % liegen. Weiterhin kümmert sie sich um die Teilnahme des Instituts an Wettbewerben wie zum familienfreundlichen Betrieb im Stadtbezirk oder bereitet die Unterlagen für das Total E-Quality-Prädikat vor. Alle zwei Jahre organisiert sie zusammen mit Kolleginnen und Kollegen ein Kinderfest am FBH, damit der Nachwuchs die Arbeitswelt der Eltern kennenlernen kann. Offensichtlich lassen sich Kinder und wissenschaftliche Karriere am FBH gut vereinbaren. Denn etwa 30 % der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des FBH haben Kinder unter 12 Jahren. Bei den Wissenschaftlerinnen und Doktorandinnen liegt dieser Anteil sogar bei etwa 50 %.

▲ Preisverleihung Familienfreundlicher Betrieb 2012 (v.l.n.r.): Bezirksbürgermeister Oliver Igel, Petra Immerz und Günther Tränkle (beide FBH).

Family-friendly workplace 2012 awarding (f.l.t.r.): district mayor Oliver Igel, Petra Immerz, and Günther Tränkle (both FBH).

# EQUAL OPPORTUNITY & FAMILY-FRIENDLY WORKPLACE

## Total E-Quality certificate

At the FBH, the Total E-Quality certificate was re-approved for another three years. In June 2009, the institute had been awarded with the certificate for its commitment and successful implementation of targeted measures towards equal opportunity for the first time. Definitely, equal opportunity gains increasing importance not only with regard to recruiting of skilled employees. European, federal, and local authorities make this aspect increasingly a criterion in public research funding. According to a resolution of the Joint Science Conference (GWK – Gemeinsame Wissenschaftskonferenz), also target rates for the share of women at research institutions have to be implemented until 2017.

This way, the proportion of women on each level of qualification shall be at least as high as within the level below. The FBH already comes close to the requirements of this “cascade model” and continues to further extend the proportion of women at the institute—especially in leadership positions.

## Family-friendly workplace award 2012

In September, the FBH was awarded for the fourth time as family-friendly workplace in Trep-tow-Köpenick. The challenge cup trophy and the prize money were handed over by Oliver Igel. The district mayor was so interested in FBH's activities, especially its close-knit network with regional companies, that he visited the institute only soon after the awarding ceremony.

## Equal opportunity commissioner re-elected

Already for the fourth time, Ute Zeimer has been consecutively elected to officially represent equal opportunity at the FBH. The mother of two grown-up children with a Ph.D. in physics is also speaker of all equal opportunity officers within the Forschungsverbund Berlin e.V. (FVB)—to which the FBH belongs as one of eight institutes. Ute Zeimer is therefore not only the contact person for the FVB administration and for her colleagues from the other institutes, but is also organizing the yearly workshop for doctoral students and postdoctoral scientists within a supporting team. At this event, ten female scientists from FVB institutes at a time are trained regarding soft skills and prepared for future leading positions. Most certainly, boredom is no issue for Ute Zeimer: In addition to her position as group leader for materials analytics at the FBH, she participates in recruitment processes and supports the institute's board in increasing the proportion of women, specifically in terms of Ph.D. positions. Thus, she regards it a success that the proportion of female Ph.D. students has been increased to 27%—although the number of female graduates in physics still ranges below 20%. Ute Zeimer is additionally concerned with competitions like the family-friendly workplace in the district and preparing the data for the Total E-Quality certificate. Every two years, she organizes a children's event at the FBH so that the offspring gets to know about the working environment of their parents. Obviously, children and scientific career are well compatible at the FBH as around 30% of the co-workers at the institute are parents of children aged under 12 years. This proportion even mounts to about 50% in the case of female scientists and Ph.D. students



▲ Wolfgang Heinrich (l.), stellvertretender Direktor des FBH, und Gleichstellungsbeauftragte Ute Zeimer (m.) bei der Verleihung des Total E-Quality Prädikats.

Wolfgang Heinrich (l.), FBH's Deputy Director, and equal opportunity commissioner Ute Zeimer (m.) at the conferment of the Total E-Quality certificate.

▼ Ute Zeimer, die langjährige Gleichstellungsbeauftragte des FBH.

Ute Zeimer, long-term equal opportunity commissioner at the FBH.



## VERWALTUNG: REIBUNGSLOS ORGANISIERT...

### **Neuorganisation in der FBH-Verwaltung – verbesserter Informationsfluss**

Aufgrund der stetig steigenden Mitarbeiterzahl – beinahe eine Verdoppelung in den vergangenen zehn Jahren – führte das FBH Mitte des Jahres interne Umstrukturierungen durch. Zur Straffung der Organisationsstrukturen wurden die Gruppen Verwaltung und EDV in die Abteilung Wissenschaftsmanagement unter Leitung von Nicolas Hübener eingegliedert. Damit sollen die Informationsflüsse sowohl intern wie auch zur Verbundverwaltung des Forschungsverbundes Berlin und den Zuwendungsgebern gebündelt werden.

Zudem wurde das Intranet im letzten Jahr vollkommen neu strukturiert und nutzerfreundlich umgestaltet. Damit stehen den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern wichtige Informationen unkompliziert zur Verfügung. Neben einer Suchfunktion, die das Auffinden von Inhalten erleichtert, wurde eine Feedback-Funktion neu geschaffen. Über diesen „Flurfunk“ gelangen Anregungen, Hinweise oder Kritik direkt zur Institutsleitung – namentlich oder auch anonym. Anliegen von allgemeinem Interesse werden in den zentralen Institutsgremien und dem zweimonatlich erscheinenden FBH-Newsletter behandelt.

### **Die FVB-Geschäftsführung wird weiblich: Manuela Urban folgt auf Falk Fabich**

Zum 1. Oktober übernahm Dr. Manuela Urban die Geschäftsführung des Forschungsverbundes Berlin e.V. (FVB), der Trägereinrichtung von acht wissenschaftlich eigenständigen Forschungsinstituten – darunter das Ferdinand-Braun-Institut. Frau Dr. Urban ist Mitglied des Vorstandes und leitet die gemeinsame administrative Infrastruktur. Die 48-jährige Molekularbiologin mit zusätzlichem MBA-Abschluss kommt vom Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin und folgt auf Dr. Falk Fabich. Fabich hatte den FVB seit seiner Gründung 20 Jahre lang geleitet und ging in den Ruhestand – über Umwege, denn zunächst übernahm er kommissarisch die Leitung des Deutschen Schiffahrtsmuseums in Bremerhaven. Unter Fabichs Führung ist es gelungen, eine effiziente, dienstleistungsorientierte Verwaltung für die Institute des FVB zu schaffen. Diese Verbundverwaltung bündelt die Administration der acht natur-, lebens- und umweltwissenschaftlichen Leibniz-Institute in Berlin und macht sie dadurch leistungsfähiger und effizienter.

## ADMINISTRATION: SMOOTHLY ORGANIZED...

### Reorganization within FBH administration—improved information flow

In mid-2012, FBH re-structured its internal administrative units due to the steady growing amount of co-workers—the number almost doubled during the last ten years. Administration and IT support were thus integrated into the Science Management Department led by Nicolas Hübener to bundle the information flow within the institute, to the common administration (Verbundverwaltung), and to public funding institutions.

Moreover, the intranet was entirely restructured and redesigned in terms of user-friendliness. Thus, FBH employees have easy access to all important information concerning the institute and its operations. In addition to a search function simplifying to find content, a feedback function was implemented. With this "Flurfunk" (office grapevine), suggestions, ideas, and critical reviews can be launched directly to the management—either by name or anonymously. Matters of general concern are discussed in the internal committees of the institute and published in the two-monthly FBH newsletter.

### FVB management becomes female: Manuela Urban successor to Falk Fabich

On October 1, Dr. Manuela Urban took over the management of the Forschungsverbund Berlin e.V. (FVB), the legal entity of eight scientifically independent research institutions, among them the Ferdinand-Braun-Institut. Dr. Urban is a member of the board and manages the common administrative infrastructure. The 48-year-old molecular biologist with additional MBA graduation comes from the Max Planck Institute for Molecular Genetics and succeeds Dr. Falk Fabich in this position. Fabich had been managing the FVB for 20 years since its foundation and retired in 2012—with a loop way, since he took over the temporary management of the German Maritime Museum (DSM) in Bremerhaven. Under Fabich's guidance, an efficient and service-oriented administration for the FVB institutes has been successfully established. This common administration bundles administrative processes of the eight natural, medical, and environmental scientific research institutes in Berlin and makes them thus more capable and efficient.

▼ *Manuela Urban beim Festakt zum 20-jährigen Bestehen des FVB – im Hintergrund ihr Vorgänger Falk Fabich.*

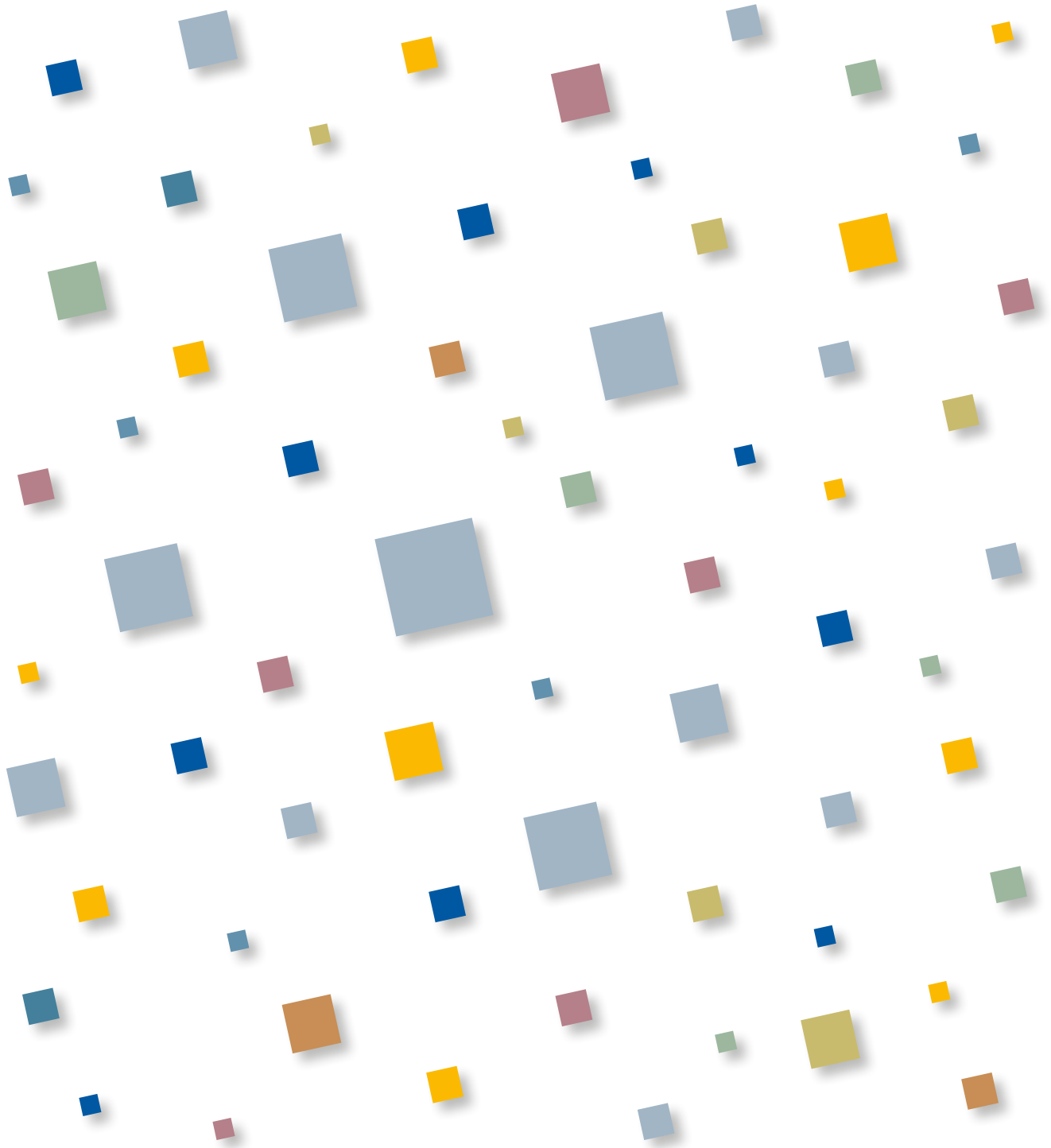
*Manuela Urban at the ceremony celebrating 20 years existence of FVB—in the background her predecessor Falk Fabich.*







# MICROWAVE COMPONENTS & SYSTEMS MIKROWELLENKOMponentEN & SYSTEME



# MIKROWELLENKOMPONENTEN & -SYSTEME

Der Schwerpunkt im Bereich der Mikrowellenbauelemente und -schaltungen liegt auf Komponenten, die auf III/V-Halbleitern basieren – am FBH sind dies Galliumnitrid (GaN) und Indiumphosphid (InP) – sowie der zugehörigen Design- und Messtechnik-Kompetenz. Das FBH bietet daher die vollständige Wertschöpfungskette, von der Epitaxie und Prozesstechnologie bis hin zu CAD, Messtechnik und Chipaufbauten.

Im Mittelpunkt stehen Leistungsbaulemente für den Frequenzbereich von 1 bis 10 GHz auf der Basis von GaN und integrierte Schaltungen für Frequenzen oberhalb 100 GHz, die mit einem am FBH entwickelten InP-HBT-Transfersubstrat-Prozess realisiert werden. Dabei wird, in Zusammenarbeit mit dem IHP in Frankfurt/Oder, auch die Heterointegration von InP auf BiCMOS eingesetzt.

Im Einzelnen umfasst das Forschungsgebiet folgende Themen:

- GaN-Hochleistungs-Transistoren (HEMTs) und -MMICs für Frequenzen von 1 bis 10 GHz und den Leistungsbereich von 10 bis 100 W
- Robuste rauscharme GaN-MMIC-Verstärker
- InP-HBT-MMICs für Betriebsfrequenzen um 100 GHz und darüber, auf AlN-Substrat und als InP-auf-CMOS-Lösung
- Integrierte Mikrowellen-Quellen zur Plasmaerzeugung im 2 GHz-Band

Diese Aktivitäten adressieren Schlüsselkomponenten für die drahtlose Kommunikation wie Basisstationen für die Mobilkommunikation sowie für Radar- und bildgebende Systeme. Auch Mikrowellen-Plasmaquellen gehören zum Portfolio, für die Leistungs-Mikrowellenelektronik zusammen mit Strukturen zur Plasma-Anregung integriert wird.

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. Die Abteilung Mikrowellentechnik ist ein Kompetenzzentrum für Mikrowellen- und Millimeterwellen-Design inklusive der entsprechenden Aufbautechnik. Leistungsfähige Methoden zur dreidimensionalen elektromagnetischen Simulation, der Transistormodellierung und dem Schaltungsentwurf sind sowohl Forschungsgegenstand als auch Werkzeuge zur Entwicklung von Komponenten. Eine spezialisierte Messtechnik ermöglicht die Charakterisierung der Bauelemente bis zu Frequenzen von 220 GHz, die Erweiterungen für S-Parameter-Messungen bis 500 GHz werden derzeit installiert.

# MICROWAVE COMPONENTS & SYSTEMS

In line with the semiconductor technologies available at FBH, the focus in the field of microwave devices and circuits is on III-V semiconductor components—in this case, gallium nitride (GaN) and indium phosphide (InP) devices—and the corresponding design and measurement expertise. Thus, FBH offers the entire value-added chain from epitaxy and processing to computer-aided design, measurements, and packaging.

The core work is devoted to high-power discretes and MMICs for the frequency range between 1 and 10 GHz based on GaN and on integrated circuits for frequencies beyond 100 GHz, which are realized using the FBH InP-HBT transferred-substrate process. This includes an InP-on-BiCMOS integration technology, which has been developed in cooperation with the IHP at Frankfurt/Oder.

In more detail, the topics of research include:

- GaN high-power transistors (HEMTs) and MMICs for 1 to 10 GHz with 10 to 100 W output power
- Robust low-noise GaN amplifier MMICs
- InP-HBT MMICs for operation at frequencies of 100 GHz and beyond, on AlN substrate and as InP-on-BiCMOS solution
- Integrated microwave sources for plasma generation (2 GHz range)

The activities are focusing on key components for wireless communications, such as cellular radio base-stations and radar and imaging systems. The portfolio also includes microwave plasma sources, integrating power electronics together with excitation structures for plasma generation.

The relevant GaN and InP processes are developed and maintained by FBH's technology departments and the Business Area GaN Electronics, respectively. Cleanroom laboratories with industry-level equipment offer the capabilities required for state-of-the-art device performance. The Microwave Department is a center of competence for microwave and mm-wave IC design and the respective packaging. Advanced methods for 3D electromagnetic simulation as well as transistor modeling and circuit design are both subject of research and routinely available as tools for component development. Dedicated measurement equipment allows characterization for frequencies up to 220 GHz, the extensions to 500 GHz S-parameter measurements are being installed.

## COMPACT & FLEXIBLE RF POWER AMPLIFIER MODULES FOR THE NEXT-GENERATION MOBILE COMMUNICATION INFRASTRUCTURE

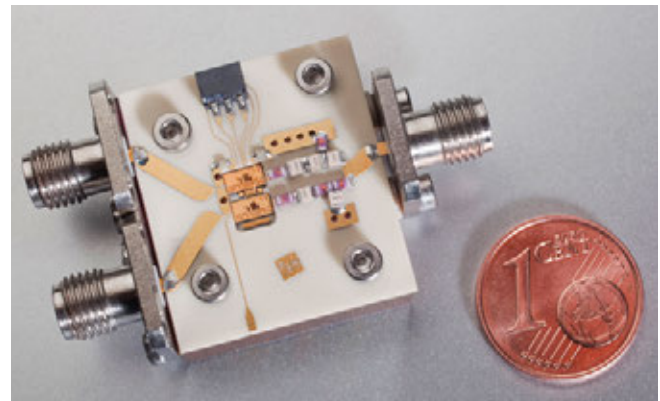
The development of wireless communications is driven by continuously increasing data rates coming along with an ever increasing variety of services and a rising number of subscribers. This puts growing demands on today's and next-generation wireless infrastructure. Highly efficient and flexible low-cost solutions are of particular interest. Thus, communication standards such as LTE (4G) with spectrum-efficient and flexible modulation schemes are applied, optimizing the exploitation of the available limited bandwidth. As a consequence, the RF power amplifier (PA), as the most power consuming part in the transmitter architecture, is operated at high peak-to-average power ratios (PAPR). When using standard linear PA concepts like class-AB this significantly reduces efficiency as these amplifiers are optimized for operation at peak output power ( $P_{out}$ ).

Therefore, further optimization is necessary. The switch-mode PA concepts offer various promising solutions and techniques. Here, the transistor is operated as a switch only in on- and off-state, which minimizes overlap between current and voltage at the output and thus power loss. However, although having a much higher potential in terms of peak efficiency, the standard switch-mode concepts do not show a better PAPR performance. In order to improve efficiency at usual PAPR values between 6 and 8 dB, one commonly employs combinations of PA concepts such as Doherty or envelope tracking (ET).

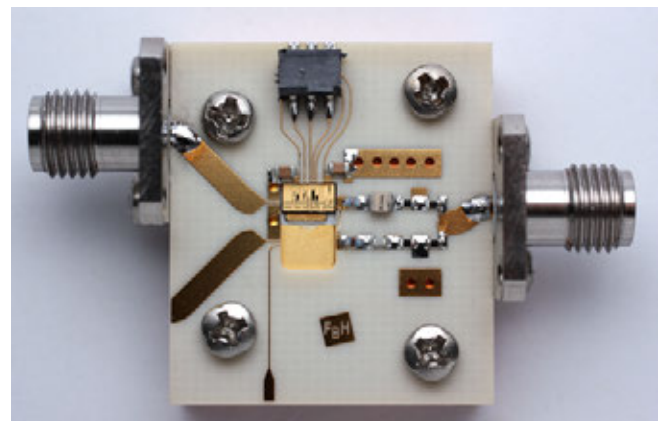
An additional target is to increase the digital contents in the base-station architecture, which additionally promises more flexible frequency usage and large signal bandwidths. For this purpose, the pulse-driven amplifier types (classes S, D) have proven to be suitable candidates and therefore became the subject of intensive research. FBH has been contributing leading-edge results in this field over the past years, using GaN-based MMICs. In 2012, this work was extended in two directions: 1) an H-bridge class-D power amplifier for the 900 MHz band increases flexibility of input signal modulation and 2) a dual-band voltage-mode class-D (VMCD) power amplifier covers the LTE frequency bands at 0.8 GHz and 1.8 GHz. The realized amplifier modules are shown in Fig. 1 (H-bridge PA) and Fig. 2 (dual-band VMCD PA), respectively. The schematics of both PAs can be compared in Fig. 3.

The H-bridge uses two complementary voltage-switching class-D PAs with two final stage transistors each, acting as a switch. Due to its topology the H-bridge approach provides two important advantages compared to the simple voltage-mode configuration: It allows doubling the output power and to handle also ternary (3-state) coding.

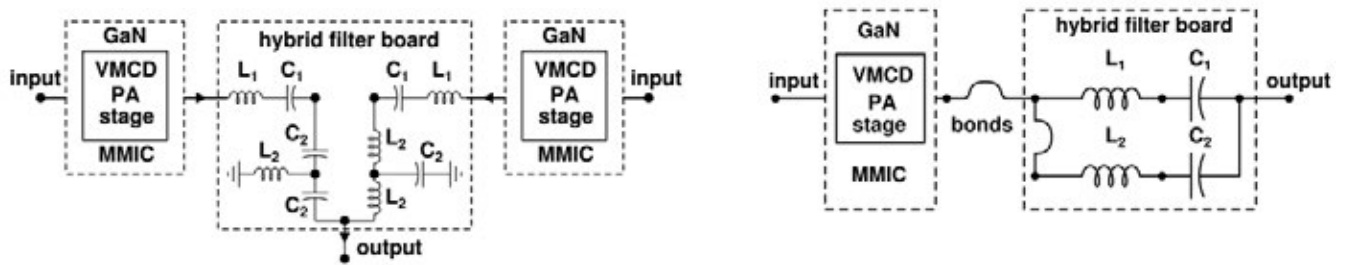
The realized compact amplifier module (see Fig. 1) achieves a peak output power of 10 W and efficiencies of up to 63 %. This is the first microwave H-bridge PA in this power range. As the main focus was to reduce efficiency degradation with increasing PAPR, several coding schemes based on binary and ternary pulses were investigated.



▲ **Fig. 1.** Realized H-bridge class-D PA module for 900 MHz band; size:  $40 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$ .



▲ **Fig. 2.** Realized dual-band voltage-mode class-D PA module for 0.8/1.8 GHz; size:  $22 \times 25 \times 9 \text{ mm}^3$ .



▲ Fig. 3. Schematic of realized H-bridge (left) and dual-band (right) power amplifier module.

The lowest decrease in efficiency over a 10 dB PAPR range was achieved by using pulse-width modulated input signals, encoding amplitudes by varying the number of switching events. Efficiency decreases from 58 % at full-scale down to about 30 % at 10 dB PAPR. Future work must address the exploitation of the potential of ternary coding schemes in order to further optimize efficiency behavior over PAPR.

The dual-band voltage-mode class-D power amplifier suitable for the LTE frequency bands of 0.8/1.8 GHz was realized by using a GaN voltage-mode PA MMIC and a hybrid dual-band filter. This very compact and highly flexible amplifier module (see Fig. 2) is a core component for future remote radio-head installations that require peak output powers in the 10 W range only but with a small form factor.

The amplifier was tested with various pulse-mode and digital-modulation schemes. For a pulse-width modulated input signal the PA achieves a maximum output power of 5.4 W at 0.85 GHz and 4.3 W at 1.8 GHz. Peak drain efficiency values are 84 % and 54 % for 0.85 GHz and 1.8 GHz, respectively. At 6 dB PAPR, drain efficiencies of 40 % (0.85 GHz) and 25 % (1.8 GHz) are obtained. Frequency can be switched simply by changing the input modulation. This is the first demonstration of a pulse-modulation based or S-class dual-band PA in the microwave frequency range at output powers beyond 1 W. The approach offers full flexibility regarding the input signal and thus facilitates integration into next-generation digital transmitter architectures.

#### PUBLICATIONS

A. Wentzel, C. Meliani, G. Fischer, W. Heinrich, "An 8 W GaN-based H-Bridge Class-D PA for the 900 MHz Band Enabling Ternary Coding", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, WEPG-14, Montreal, Canada (2012).

A. Wentzel, S. Hori, M. Hayakawa, K. Kunihiro, W. Heinrich, "Envelope Delta-Sigma Modulated Voltage-Mode Class-S PA", Proceedings of the 42<sup>nd</sup> European Microwave Conference (EuMC), pp. 120–123, Amsterdam, The Netherlands (2012).

#### ZUSAMMENFASSUNG

Seit mehreren Jahren realisiert das FBH digitale HF-Schaltverstärkerkonzepte (Klasse-D, Klasse-S), die auf GaN-MMICs basieren. Sie liefern die Voraussetzungen für kostengünstigere Mobilfunk-Basisstationen mit optimierter Effizienz und Flexibilität. 2012 ist es gelungen, die Flexibilität dieser Schaltverstärker bezüglich des Eingangssignals zu erweitern: Zum einen wurde ein H-Brücke-Klasse-D-Verstärker bei 900 MHz realisiert und zum anderen ein Dual-Band-Voltage-Mode-Klasse-D-Verstärker bei 0,85 und 1,8 GHz.

Die H-Brücke erreicht maximale Ausgangsleistungen von 10 W und Effizienzen von 63 %. Bei einem hohen Verhältnis von Spitzen- zu Mittelwert der Eingangsleistung (PAPR) von üblicherweise 10 dB erreicht der Verstärker noch 30 % Effizienz. Das sind Rekordwerte für eine H-Brücke im 900-MHz-Bereich. Der Dual-Band Verstärker erzielt bei 0,85 beziehungsweise 1,8 GHz maximale Ausgangsleistungen von 5,4 beziehungsweise 4,3 W und Effizienzen von 84 % (0,85 GHz) und 54 % (1,8 GHz). Das ist der weltweit erste, auf Pulsmodulation basierende Dual-Band-Verstärker für die LTE-Frequenzbänder, der Ausgangsleistungen von mehr als 1 W liefert.

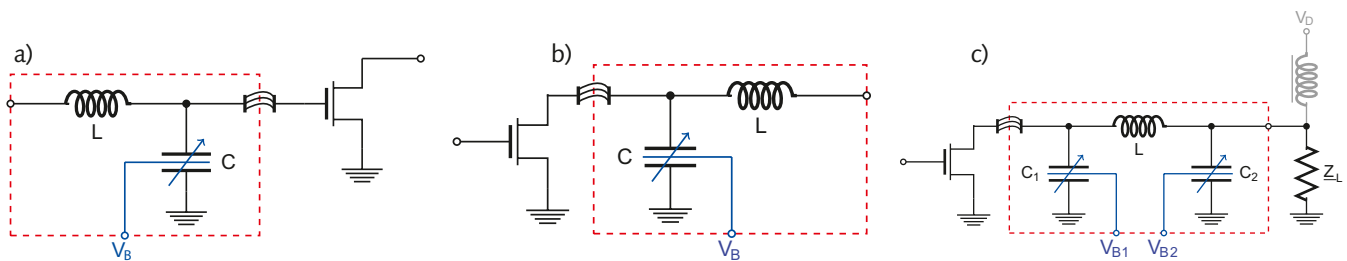
# DISCRETE TUNABLE PRE-MATCHING GAN-BST TRANSISTORS

In the present smart phone era, the border between wireless computer communication, WLAN and WiMAX, and cellular systems like UMTS and LTE is vanishing. This places high demands on the future mobile communication infrastructure that does not only have to work with multiple communication standards but also with signals spread over frequency bands covering the full 500 MHz to 6 GHz range. Reconfigurable or tunable systems may be one alternative for the base-station suppliers to reduce development time and costs and to cut down operation expenses. Such systems have mostly been implemented with tunable matching network designs based on semiconductor varactor diodes or micro-electromechanical system components (MEMS) in combination with traditional discrete transistors. The Ferdinand-Braun-Institut is together with the Technische Universität Darmstadt developing an alternative solution based on novel discrete tunable pre-matching (TpM) RF-power transistors.

The TpM transistor consists of a GaN HEMT combined with thick-film Barium-Strontium-Titanate (BST) tunable pre-matching networks, integrated into a single package. This solution enables pre-matched discrete RF-power transistors that can be tuned for multi-band operation, improved in-band performance, and for increased back-off efficiency through load modulation.

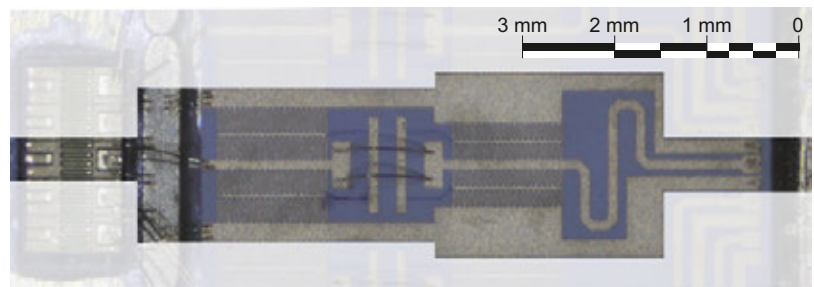
The ceramic material BST shows a field-dependent permittivity, which allows the realization of tunable components such as varactors. The thick-film BST components in this work are fast to tune and show high linearity, which is required in power amplifier applications. The size and power handling capabilities also make thick-film BST very suitable to integrate into a package jointly with a modern RF-power GaN transistor.

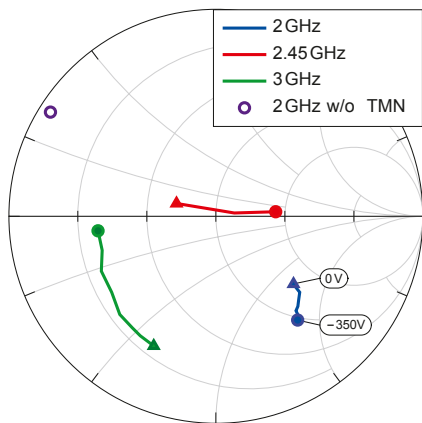
Fig. 1 shows some principle topologies that have been implemented. A varactor on the source side as in (a) can be used for increased band-width, gain control, and improved return loss within band whereas an L-topology varactor on the load side (b) can be utilized for re-configurability and increased bandwidth, but also for dynamic load-modulation. When several varactors are combined as in the  $\pi$ -topology network (c), full tuning to  $50\ \Omega$  can be achieved but over a more limited bandwidth.



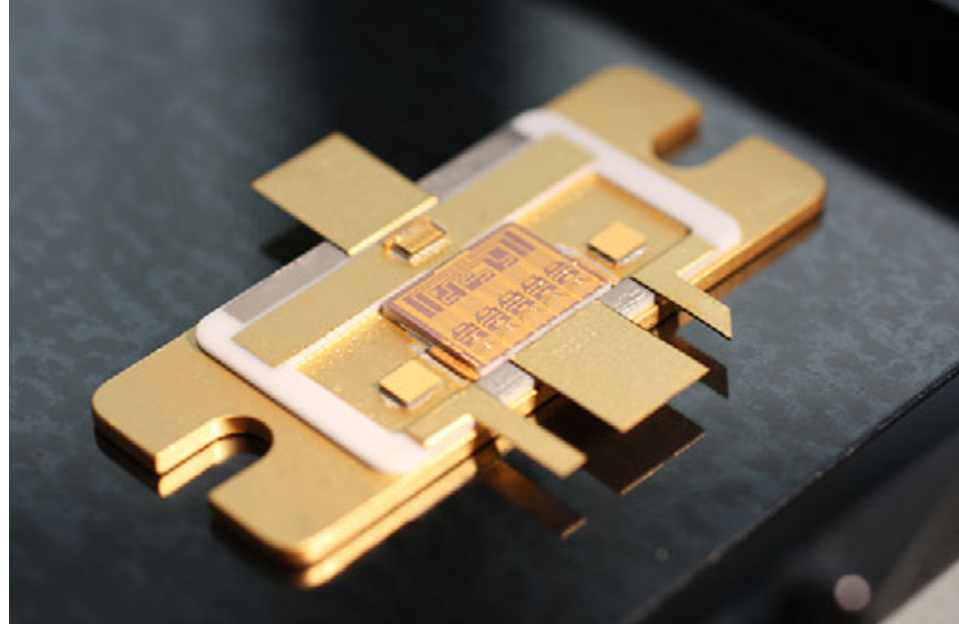
▲ **Fig. 1.** Topologies of integrated tunable pre-matching networks. Source tuning L-topology network (a), load tuning L-topology network (b), and load tuning  $\pi$ -topology network (c).

► **Fig. 2.** Tunable assembly with GaN transistor (left) and tunable impedance  $\pi$ -topology pre-matching network (right)—a single transistor cell is highlighted.





▲ Fig. 3. Impedance tuning range of a pre-matching L-topology source-tuning network.



▲ Fig. 4.  $\pi$ -topology pre-matching network integrated on the load side of a discrete 5-cell powerbar transistor.

The networks are realized on a single BST ceramic substrate with the capacitors C being voltage-tunable planar interdigital BST varactors and L being inductors realized by bond wires. The tuning voltages of the varactors are decoupled using anti-series varactor pairs and high resistance bias lines. Fig. 2 shows a realized  $\pi$ -topology tunable pre-matching transistor assembly for a single cell. A typical example of the tunability is shown in Fig. 3, where a transistor with an L-topology source pre-matching is adjusted to different frequencies for several varactor control voltages. Fig. 4 depicts the realized configuration for a discrete load-tunable 5-cell powerbar.

As a novel technology, there are still many issues to solve. The near-future work is focusing on decreasing the losses and improving the temperature stability of the BST varactors.

The project is conducted in cooperation with the Institute of Microwave Engineering and Photonics at Technische Universität Darmstadt where the varactors are fabricated. The ceramic BST material is manufactured at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

#### ZUSAMMENFASSUNG

Im Zeitalter der Smartphones verschwimmt die Grenze zwischen drahtloser Kommunikation von Computern (WLAN, WiMAX) und zellulären Systemen wie UMTS und LTE. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die Infrastruktur der Mobilkommunikation: Sie muss nicht nur mit mehreren Kommunikationsstandards kompatibel sein, sondern auch mit Signalen, die über Frequenzbänder im gesamten Bereich von 500 MHz bis 6 GHz verteilt sind. Das Ferdinand-Braun-Institut entwickelt derzeit in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Darmstadt einen neuartigen Mikrowellen-Leistungstransistor, der die Möglichkeit eines abstimmbaren Pre-matching bietet. Hierzu wird ein GaN-HEMT zusammen mit einem Barium-Strontium-Titanat-Netzwerk im Gehäuse integriert. So können Leistungstransistoren hergestellt werden, die für den Betrieb auf mehreren Frequenzbändern dynamisch eingestellt werden können. Außerdem ist damit eine Lastmodulation möglich, um beispielsweise den Wirkungsgrad bei niedrigen Ausgangsleistungen zu verbessern.

#### PUBLICATIONS

H. Maune, A. Wiens, O. Bengtsson, W. Heinrich, R. Jakoby, "Current Status of Tunable RF Components Based on Ferroelectric Thick Films for Power Amplifiers", PA Symposium (invited), San-Diego, USA, September (2012).

H. Maune, O. Bengtsson, F. Gölden, M. Sazegar, R. Jakoby, W. Heinrich, "Tunable RF GaN-Power Transistor Implementing Impedance Matching Networks Based on BST Thick Films", EuMiC-2012, Amsterdam, The Netherlands, November (2012).

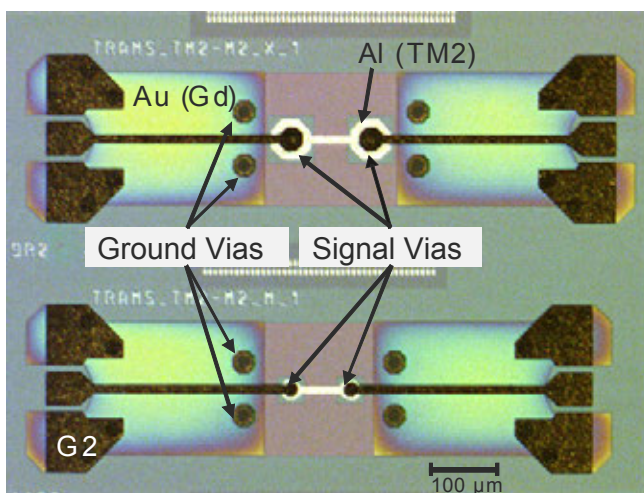
O. Bengtsson, H. Maune, F. Gölden, S. Chevtchenko, M. Sazegar, P. Kurpas, A. Wiens, R. Jakoby, W. Heinrich, "Discrete Tunable RF-Power GaN-BST Transistors", 42<sup>nd</sup> European Microwave Conf. (EuMC), Amsterdam, The Netherlands, Oct. 28–Nov. 2, pp. 703–706 (2012).

# MILLIMETER-WAVE CIRCUITS USING A NOVEL INP-HBT-ON-SiGe-BICMOS TECHNOLOGY

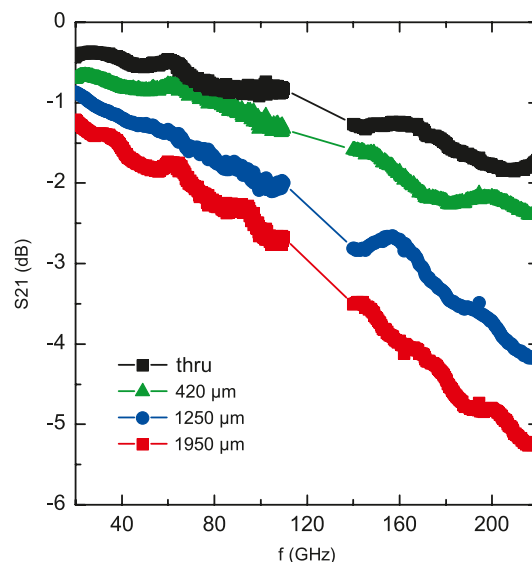
Indium phosphide (InP) hetero-bipolar transistor (HBT) high-frequency circuits on top of BiCMOS circuitry have been developed for power applications at terahertz frequencies of 0.1–1 THz. Such devices can be used for high-resolution imaging for industrial quality control, medical and security applications, THz imaging, and ultra-high bandwidth communications. Modern silicon technology provides a high level of integration, complexity, and yield, while InP offers higher frequency and power levels. In the joint Leibniz project Silicon-III-V-Hetero-integration for Terahertz-Electronics (HiTeK) with the Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) our InP HBT process has been successfully combined with IHP's silicon-germanium (SiGe) BiCMOS process.

The novel InP-on-BiCMOS process is described on page 108 of this report. From the mm-wave designer's point of view, two features are essential: First, the InP-HBT-based and the SiGe-BiCMOS circuits should not degrade in performance due to the combined processing. Second, low-loss transmission-line structures and interconnects between the InP and the BiCMOS parts must be possible. The InP-on-BiCMOS process presented here offers excellent solutions in both regards. Finally, it is important to have the necessary design tools available, covering both technologies in a seamless way.

As for the interconnect issue, Fig. 1 shows thin-film microstrip structures that have been fabricated. They consist of signal lines changing from InP (G2) down to Si (M2) and ground lines from InP (Gd) to Si (TM2). Beside this configuration, microstrip lines have also been tested in other arrangements, with different lengths and varying numbers of transitions and via hole diameters. Fig. 2 presents measurement results. As can be extracted from the data in Fig. 2, the insertion loss per interconnect is lower than 0.5 dB up to 100 GHz and below 1 dB for the entire range up to 220 GHz, without any indication of resonances or stop-bands. This documents the excellent broadband properties of the interconnects.

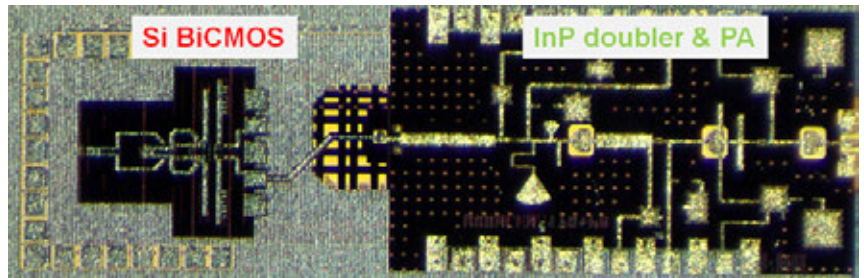


▲ **Fig. 1.** Two microstrip structures with different via diameters fabricated in transfer substrate technology with two ground and four signal via holes in the adjacent IHP metallization layer.



▲ **Fig. 2.**  $S_{21}$  as a function of frequency for test structures consisting of two signal vias, four ground vias, and BiCMOS transmission lines of different lengths (no data measured in the frequency range between 110 GHz and 140 GHz).





► **Fig. 3.** Integrated circuit fabricated in transfer substrate technology consisting of a 82 GHz VCO in SiGe BiCMOS and a 164 GHz frequency doubler and power amplifier with InP HBTs.

A number of combined circuits was realized in the HiTeK process employing a BiCMOS VCO as a signal source at 48 GHz with frequency doublers and power amplifiers at 48 GHz, 96 GHz, and 164 GHz. Fig. 3 illustrates an example of the function blocks realized with the first full run in the new InP-on-BiCMOS technology. It shows a 164 GHz source, consisting of a 82 GHz BiCMOS voltage-controlled oscillator, which feeds an InP frequency doubler and power amplifier. The transistor model developed for the standard TS-InP process at FBH was used for the design of InP-on-BiCMOS MMICs and the measurements are in good agreement with simulations. This demonstrates that the heterointegration process has only minor effects on small-signal InP HBT performance. For the doubler signal source, 0 dBm output power at 164 GHz is achieved, which is a state-of-the-art result. This proves feasibility and functionality of the HiTeK process.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Am FBH wurde in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) eine Schlüsseltechnologie für hohe Leistungs- und Frequenzbereiche entwickelt. Diese wird unter anderem für bildgebende Anwendungen benötigt, die eine hohe Auflösung erfordern, wie etwa zur industriellen Prozesskontrolle oder bei medizinischen und Sicherheitsanwendungen. Die neuartige Technologie vereint in einem Chip die Vorteile bezüglich hoher Frequenzen und Leistungen des InP-DHBT-Prozesses aus dem FBH mit jenen der SiGe-BiCMOS-Technologie des IHP hinsichtlich Komplexität und Integrationsdichte. Diese Heterointegrations-Plattform ist für MMICs im Frequenzbereich von 0,1–1 THz vorgesehen. Die Vorteile der neuartigen Technologie sind eine verlustarme Verbindungstechnik, die monolithische Integration von BiCMOS-/InP-DHBT-MMICs und ein durchgängiger Schaltungsentwurf. Entsprechende MMICs wurden entworfen und bis 180 GHz erfolgreich getestet. Die entwickelten Verbindungstechnologien und MMICs wurden messtechnisch verifiziert und bestätigen die erfolgreiche Implementierung der Plattform.

#### PUBLICATIONS

I. Ostermay, F.J. Schmückle, R. Doerner, A. Thies, M. Lisker, A. Trusch, E. Matthus, Y. Borokhovych, B. Tillack, W. Heinrich, T. Kraemer, V. Krozer, O. Krüger, T. Jensen, **"220 GHz Interconnects for InP HBT on SiGe BiCMOS Integration"**, presented at IMS 2013, Seattle (2013).

**Outlook:** T. Jensen, T. Al-Sawaf, M. Lisker, S. Glisic, M. Elkhoully, T. Kraemer, I. Ostermay, C. Meliani, B. Tillack, V. Krozer, W. Heinrich, **"A 164 GHz Hetero-Integrated Source in InP-on-BiCMOS Technology"**, to be presented at EuMIC 2013, Nuremberg, Germany, Oct. 2013.

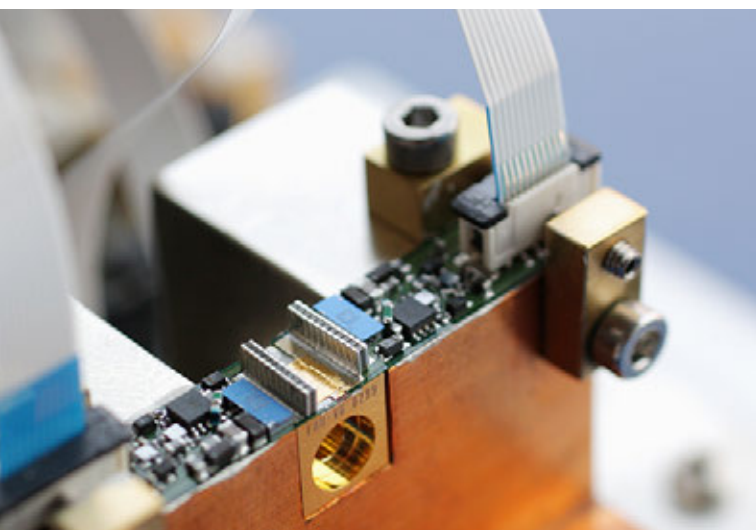
## COMPACT HIGH-CURRENT LASER-PULSE SOURCES WITH HIGH EFFICIENCY

There is an increasing demand for semiconductor-based laser sources emitting pulses in the nanosecond range with stabilized wavelength and peak powers ranging from several Watts to hundreds of Watts. Several highly attractive applications require short and high-power laser pulses. These include fluorescence spectroscopy and metrology, micromachining, biomedical systems, optical free-space communications and nonlinear optics. With higher laser power and thus higher driver current, efficiency of the current driver becomes a challenge. At FBH, we address this problem by using GaN transistors and applying a smart design for the hybrid driver circuit of the final stage.

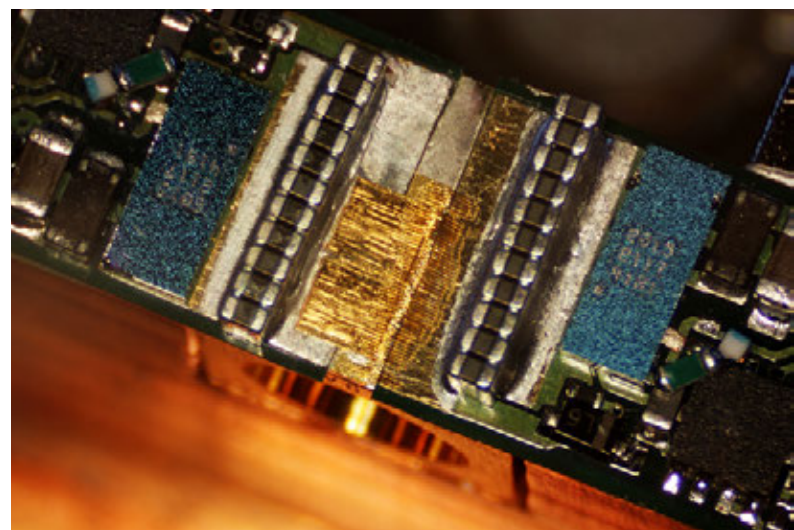
GaN transistors are best suited for high-power, high-current switches due to their very low on-resistance. The low input, output and internal feedback capacitances allow for the design of very fast switches. On the other hand, the high-power laser diodes we are interested in here show a very low input resistance, which leads to high current levels. Previous designs use mostly matched lines to feed the laser. In this case, the distance between final driver stage and laser is not critical, but such broadband matching for pulse applications requires resistive components since they dramatically reduce efficiency. Thus, either very big high-power supplies would be necessary or only low repetition rates would be possible.

Therefore, we decided to go another way: Short current pulses to the laser also minimize the parasitic components, mainly the inductance, without resistive matching the circuits. For this purpose, it is necessary not only to shorten the distance between laser switch and the reactive components, but also to minimize the current loop involved and to lower the line impedance. As a result of the high efficiency achieved, cooling efforts decrease and integration into micro-optical systems becomes easier.

The high-power pulsed laser source is realized using a broad-area laser diode on C-mount. The laser diode is fed by two equal pulse-power supplies from both sides in parallel. The printed circuit boards themselves are built employing flexible polyimide laminates with a height of  $25\ \mu\text{m}$  to minimize the inductance. As depicted in Fig. 1, the width of the material is matched to the laser dimensions. The electrical interconnects to the laser are very critical. Wide contact pads with many bond wires in parallel give the necessary low inductance and hence low loss as can be seen in Fig. 2.

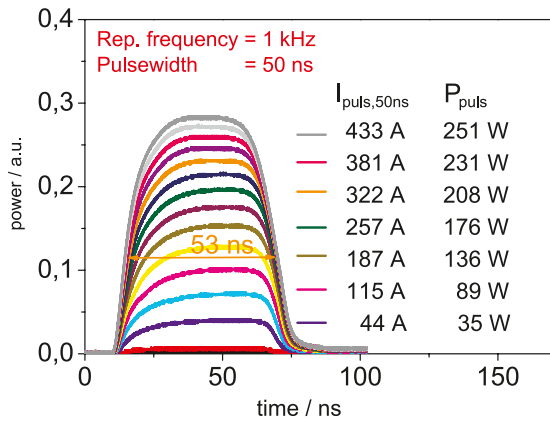


▲ Fig. 1. Realized pulse laser source with laser on C-mount.

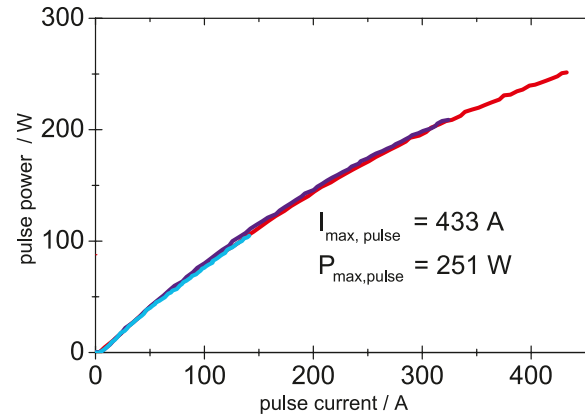


▲ Fig. 2. Interconnects between the pulse power supplies and the laser.

The TTL-compatible input pulses are fed through a ribbon cable to the driver unit. A peak current of more than 400 A for 50 ns long pulses is obtained. This peak current leads to an optical pulse peak power of 250 W for a gain-switched broad-area laser diode. The pulse width can be varied from 20 to 50 ns with a repetition rate up to 100 kHz. The electrical efficiency of this module reaches more than 50 % (Fig. 3 and Fig. 4).



▲ Fig. 3. Time behavior of 50 ns pulse.



▲ Fig. 4. Optical pulse power as a function of driver current.

The fabricated module is compact, sized only 6 mm × 43.5 mm, and shows low power consumption and thus advantageous thermal properties. This makes it very suitable for integration into micro-optical modules. With the further development of the GaN technology, these modules can be expanded to higher output current and thus increased optical output power.

#### ZUSAMMENFASSUNG

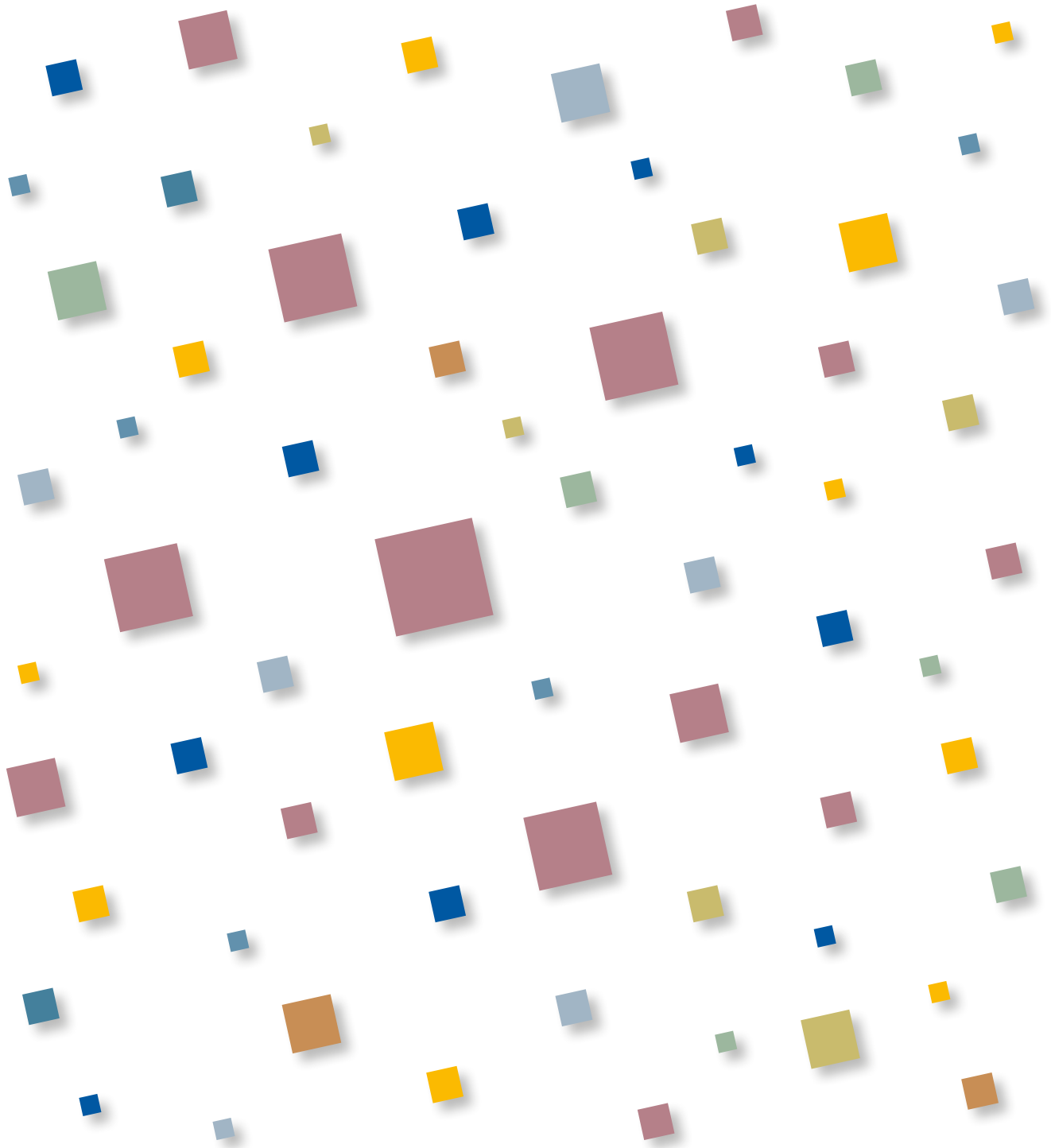
Kompakte und effiziente Halbleiter-Laserquellen, die Pulse im Nanosekundenbereich und Spitzenleistungen von einigen bis zu Hunderten von Watt liefern, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Für Anwendungen, wie etwa die Fluoreszenz-Spektroskopie, Metrologie, Materialbearbeitung, in biomedizinischen Systemen, bei der optischen Freiraum-Kommunikation und Anwendungen in der nichtlinearen Optik sind sie hoch attraktiv. Am FBH wurde eine Laserpulsquelle mit schnell schaltenden GaN-Transistoren entwickelt, die durch ihren kompakten Aufbau vor allem parasitäre Induktivitäten und Widerstandskomponenten vermeidet. Dadurch erreicht sie eine hohe Effizienz, wodurch sich der Aufwand für die Wärmeabfuhr verringert. Zudem lässt sich die Quelle unkompliziert in mikro-optische Systeme integrieren. Die auf einen C-Mount montierte Breitstreifen-Laserdiode kann mit bis zu 400 A bei einem 50 ns Puls angeregt werden und liefert Spitzenleistungen bis 250 W. Die Wiederholfrequenz beträgt bis 100 kHz bei einer elektrischen Effizienz von mehr als 50 %.

#### PUBLICATION

H. Wenzel, A. Klehr, S. Schwertfeger, A. Liero, Th. Hoffmann, O. Brox, M. Thomas, G. Erbert, G. Tränkle, "Compact sources for the generation of high-peak power wavelength stabilized laser pulses in the picoseconds and nanoseconds ranges", Proc. SPIE, vol. 8241, no. 82410V (2012).



# GAN ELECTRONICS GAN-ELEKTRONIK



## GaN-ELEKTRONIK

Die Entwicklung von Galliumnitrid (GaN)-Bauelementen für Anwendungen in der Mikrowellentechnik und der Leistungselektronik steht im Vordergrund der Arbeiten des Geschäftsbereichs GaN-Elektronik. Diese umfassen die anwendungsorientierte Konzeption der Bauelemente, die Entwicklung und Optimierung von geeigneten Prozessmodulen sowie deren Integration in einen Gesamtprozess. Die Aktivitäten decken die gesamte Wertschöpfungskette ab: von der Epitaxie bis hin zu fertig montierten Bauelementen, die reproduzierbar und lieferfähig zur Verfügung stehen.

Alle Entwicklungen beruhen auf dem synergetischen Zusammenwirken von physikalischer und thermischer Bauelementsimulation, Epitaxie, Prozesstechnologie, sowie Design und Charakterisierung. Hinzu kommen Lebensdauermessungen und die Analyse von potenziellen Ausfallmechanismen.

Für die Realisierung von diskreten GaN-Mikrowellentransistoren und monolithisch integrierten Mikrowellenschaltkreisen (MMIC) verfügt das FBH über zwei Prozessvarianten, die sich im wesentlichen durch die Gatetechnologie unterscheiden. Der 0,5 µm GaN-Prozess bedient diskrete Bauelemente für unterschiedliche Leistungsklassen bis 120 W und ist bei 2 GHz ausgelegt. Dagegen ermöglicht der 0,25 µm GaN-MMIC-Prozess monolithisch integrierte Mikrowellenschaltkreise für Anwendungen bis etwa 15 GHz. Dieser Prozess bildet die Basis für eine Vielfalt von MMIC-Schaltungsentwicklungen. Dazu gehören mehrstufige X-Band-Leistungs-MMICs, Schaltverstärker und robuste rauscharme Verstärker. Schnell schaltende, laterale Schottkydioden mit Schaltzeiten im ps-Bereich für den Einsatz in neuen Verstärkerarchitekturen erweitern den MMIC-Prozess.

National geförderte Forschungsprojekte und Industrienaufträge unterstützen die Arbeiten im Bereich der GaN-Leistungselektronik. Das FBH koordiniert zudem das europäische Verbundprojekt „GaN-based normally-off high power switching transistors for efficient power converters (HiPoSwitch)“. Im Fokus stehen selbstsperrende Schalttransistoren für hohe Betriebsspannungen bis 1200 V bei gleichzeitig geringen Einschaltwiderständen von 50 mΩ. Die dynamischen Eigenschaften dieser Bauelemente bei hohen Schaltspannungen sind entscheidend für die angestrebten Systemanwendungen. Systematische, aufeinander abgestimmte Optimierungen, sowohl des epitaktischen Aufbaus als auch der lateralen Strukturen, führten in diesem Zusammenhang zu Transistoren mit einer deutlich reduzierten dynamischen Widerstandserhöhung. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt sind thermisch optimierte, skalierfähige Transistoren in quasi-vertikaler Bauweise. Sie ermöglichen es, in der Leistungselektronik etablierte Montagetechniken einzusetzen und bieten darüber hinaus das Potenzial zur beidseitigen Entwärmung der Leistungs-Chips. Hocheffiziente, schnell schaltende GaN-Schottkydioden mit Sperrspannungen von über 1000 V runden das Portfolio ab.

Die Analyse der Zuverlässigkeit und die Identifikation von Degradationsmechanismen gewinnt an Bedeutung. Daher werden alle Entwicklungen von Zuverlässigkeitsmessungen begleitet, deren Ergebnisse iterativ in die Optimierung des Bauelementprozesses einfließen. Die Zuverlässigkeitsmessverfahren bestehen aus on-Wafer-Screening-Tests sowie thermisch aktivierten DC- und RF-Langzeittests.

Viele der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zielen auf den raschen Technologietransfer, daher bestehen in diesem Bereich verschiedene strategische Kooperationen mit industriellen Partnern. Darüber hinaus läuft die Vermarktung von GaN-Prototypen über die BeMiTec AG (Berlin Microwave Technologies), ein Spin-off des FBH.

# GaN ELECTRONICS

The Business Area GaN Electronics focuses on the development, fabrication, and characterization of GaN devices for microwave and power electronic applications. Activities focus on application-oriented device designs, the corresponding development of process modules, and their integration into a complete process flow. They are covering the full value chain, from epitaxy to completely packaged devices, which are reproducibly available for delivery to customers.

FBH developments base on the synergetic interaction between physical and thermal device simulation, epitaxy, processing technology, as well as microwave design and characterization. Lifetime measurements and the analyses of potential degradation mechanisms are complementing this work.

For the realization of discrete and monolithically integrated microwave devices based on GaN, FBH is running two process variations which mainly differ from each other regarding the gate technology. The 0.5  $\mu\text{m}$  GaN process basically covers discrete microwave power devices for different power classes up to 120 W at 2 GHz. Whereas the 0.25  $\mu\text{m}$  process is optimized for monolithically integrated microwave devices of applications up to 15 GHz. The quarter micron GaN MMIC process builds the foundation for various further circuit developments, such as multistage X-band power amplifiers, switch-mode amplifiers, and robust low-noise switch-mode amplifiers. Fast switching lateral GaN Schottky diodes are being integrated into the current GaN MMIC process in order to cope with the increasing demand for advanced amplifier topologies.

Nationally funded research projects along with industrial contracts are supporting the work on GaN power electronics. Furthermore, FBH is coordinating the European project "GaN-based normally-off high power switching transistors for efficient power converters (HiPo-Switch)". All developments focus on high-voltage normally-off transistors up to 1200 V featuring a simultaneously low on-state resistivity of 50 m $\Omega$ . The dynamic properties of these devices at high switching voltages are decisive for the targeted system applications. Systematic optimizations of epitaxial design, technology, and lateral structure design already led to transistors with considerably reduced dynamic on-state resistance increase. Thermally optimized, scalable devices in quasi-vertical technology are a further focus of development. They are compatible to established mounting schemes in power electronics and enable to dissipate heat from both sides. Highly efficient fast switching lateral GaN-Schottky diodes with blocking voltages above 1000 V complement the portfolio.

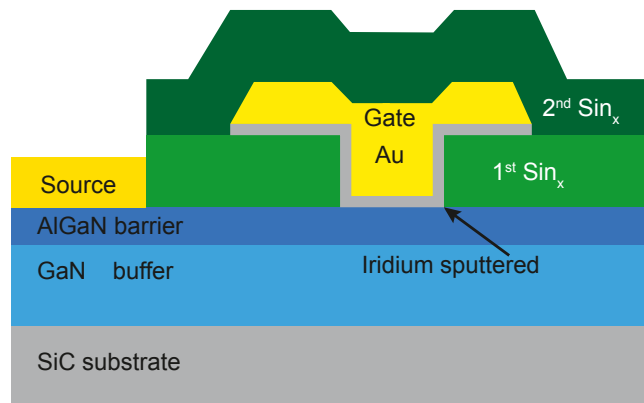
Reliability characterizations combined with identification and analyses of possible degradation mechanism are routinely performed. The results feed back into technological development and therefore ensure continuous device improvement. Reliability testing techniques such as on-wafer robustness tests and long-term thermally accelerated DC and RF degradation tests are routinely performed.

Many of the research and development activities within this field are aiming to be transferred into an industrial environment. Hence, various strategic cooperations with industrial partners have been established. In addition, the FBH spin-off BeMiTec AG (Berlin Microwave Technologies) brings GaN prototypes to the market.

## DESIGNING RELIABILITY INTO GAN DEVICES: DEVELOPMENT OF HIGHLY RELIABLE GATE TECHNOLOGY

High Electron Mobility Transistors (HEMT) based on AlGaIn/GaN are characterized by high RF power densities at microwave frequency. Impressive progress has been achieved in improving the performance of such devices. Many RF systems such as sophisticated communication and radar systems already rely on GaN transistors. Nonetheless, reliability remains an open issue that needs particular attention. The quality of the epitaxial material, however, can have a strong impact on the transistor performance and hence its reliability. As the epitaxial quality has matured it has become more obvious that process modules such as gate and ohmic contacts as well as surface passivation influence and limit the power performance of GaN HEMTs significantly. Due to the combination of high electric fields and large current densities close to the drain side edge of the gate, heat is mainly generated in this region. Therefore, a thermally stable Schottky barrier is a key condition for acceptable reliability behavior. Generally, the gate leakage current has to remain low, as excess leakage current decreases the breakdown voltage significantly. In many cases, leakage current increases while the device degrades. For the traditionally used NiAu gates fabricated by physical vapor deposition a thermal instability of the metal stack has been reported from different sources. This results in a gradual electric degradation of the gate contact.

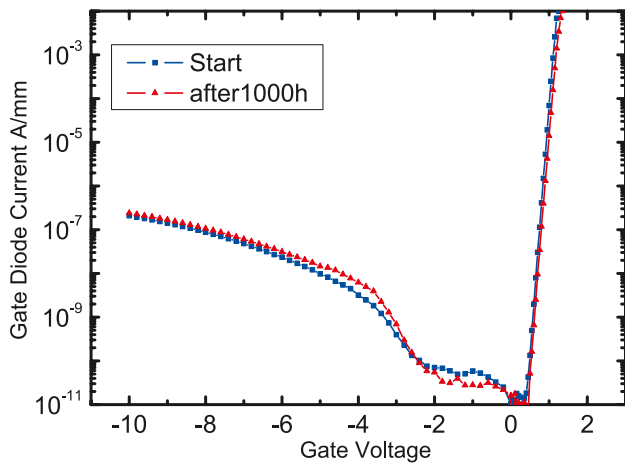
The mechanisms associated to this effect are quite complex. Currently, nickel (Ni) silicide formation between Ni and the  $\text{SiN}_x$  passivation and subsequent gold (Au) diffusion to the Ni-GaN interface are under surveillance. In order to circumvent the problems associated with evaporated nickel Schottky contacts a new gate technology has been implemented at FBH.



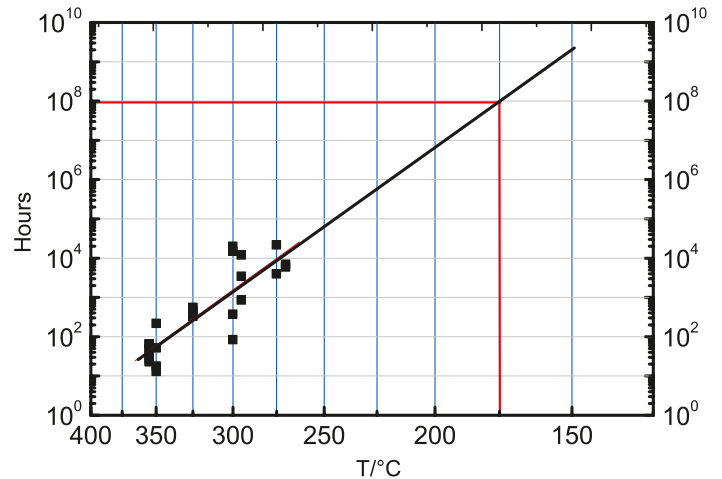
◀ **Fig. 1.** Sketch of transistor showing iridium Schottky contact with conformal coating on semiconductor and entire trench.

A gate metallic stack using iridium as a diffusion resistant Schottky contact effectively separates the highly diffusive Au metallization from the  $\text{SiN}_x$  and the GaN/AlGaIn layers underneath. Sputtering as a fabrication method allows for a full conformal coverage of the gate contact in the trench independently from the shape of the gate foot. Iridium deposition by sputtering is introduced. Iridium is a refractory metal and features an extremely high melting point (2450 °C)—thus, intermixing with other materials is low. It is considered to be the most corrosion-resistant metal. The definition of the gate structure in III-V technology is traditionally performed by lift-off technology. As metal sputtering usually conflicts with lift-off techniques, a subtractive technique for gate metal definition is used. First, the Schottky gate metal (diffusion barrier) is deposited by sputter deposition of iridium. Parameters for deposition are chosen such that conformal coverage of the surface as well as low film stress is achieved. Hereafter, the gate head, made of gold, is deposited by classical lift-off technique. Finally, the gate head is used as a mask for back-etching of excess iridium on the wafer surface. Removal of iridium is accomplished by dry etching using a low bias dry etch recipe (inductively coupled plasma etching) with high selectivity against  $\text{SiN}_x$ . In this way, the iridium Schottky metal remains under the gate head, but is removed from the  $\text{SiN}_x$  without damaging that layer. The following advantages are characterizing the subtractive method: Conformal deposition of contact metal in the entire gate trench, low stress of the contact metal, no photo resist present during deposition of Schottky metal, and sputtered barrier layers like WSiN and TiWN may be added between Schottky contact and gate head if required.





▲ **Fig. 2.** Change of gate diode current  $|I_G|$  during test at 325 °C for 1000 hours.



▲ **Fig. 3.** Arrhenius plot of maximum drain current degradation at  $30V_{DS}$  showing an extrapolated lifetime of  $10^8$  hours at 175 °C channel temperature.

For the reliability assessment of the gate module thermally accelerated lifetime tests have been performed at four different channel temperatures up to 355 °C. Accelerated testing estimates an expected lifetime of  $10^8$  hours at 175 °C channel temperature and an activation energy of 2.0 eV at 30V operation.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Zuverlässigkeit von Mikrowellen-Leistungstransistoren, die auf AlGaIn/GaN-HEMT-Strukturen basieren, wird wesentlich durch die Belastung im Gatebereich bestimmt. Hier wirken hohe elektrische Felder auf das Material, und ein thermisch stabiler Schottky-Kontakt ist für den dauerhaften Einsatz essenziell. Daher wurde als Schottky-Metall das thermisch hochfeste Iridium mit einem Schmelzpunkt von 2450 °C ausgewählt, das die hohe Belastbarkeit gewährleistet. Zudem bietet es in Kontakt mit dem Halbleiter eine hohe elektrische Barriere von 1,1 eV. Ebenso wichtig ist die konforme, das heißt gleichmäßige Bedeckung des Gatebereichs mit dem Schottky-Metall. Hierdurch werden Diffusionsvorgänge der anderen beteiligten Materialien effektiv unterbunden. Um dies zu gewährleisten, kommen erstmals eine subtraktive Prozessführung und die Metallabscheidung durch Sputterprozesse für das Gate-Modul zum Einsatz. Eine extrapolierte Lebensdauer von  $10^8$  h bei einer Temperatur des Transistorkanals von 175 °C konnte nachgewiesen werden.

#### PUBLICATION

R. Lossy, H. Blanck, J. Würfl, "Reliability studies on GaN HEMTs with sputtered iridium gate module", *Microelectronics Reliability* 52, 2144 (2012).

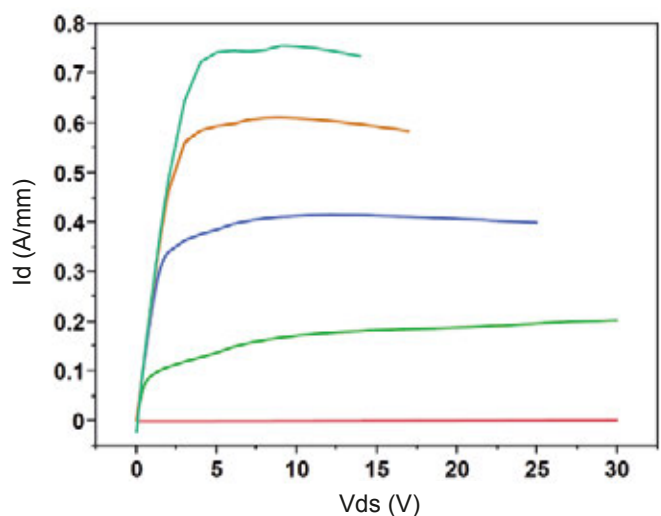
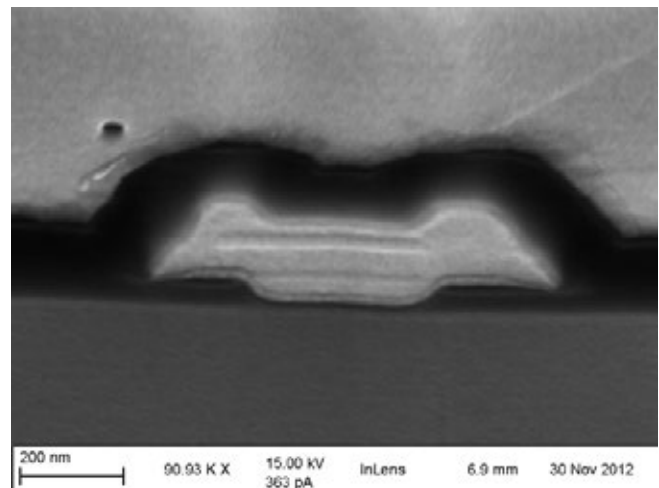
## FABRICATION OF SLANTED GATES FOR ALGaN/GaN HEMTs

Highly efficient high-power transistors based on AlGaN/GaN hetero-junction field effect transistors (HFETs) offer novel solutions for high-class applications such as radar and communication systems. The gate fabrication is a crucial part in transistor manufacturing due to its strong influence on device performance and reliability. Currently, the most commonly used technology for GaN-based HEMTs and MMICs is the so-called “embedded gate” process. Here, the gate metal is deposited into a vertical trench opening that is etched in a dielectric passivation layer usually consisting of silicon nitride ( $\text{SiN}_x$ ). The semiconductor surface properties at the bottom of the trench opening along with the semiconductor/metal interface quality determine the electrical characteristics and the reliability of the transistors. Trench etching of the dielectric layer needs to be carefully controlled to avoid detrimental effects on the semiconductor surface. Moreover, the trench etching should provide a trench geometry that allows for conformal metal coverage without void formation. A trapezoidal profile of the gate trench (slanted gate) will also reduce the electric field, predominantly at the drain-side edge. This improves device reliability and reduces dispersion effects. Two approaches towards slanted gates are developed to investigate their respective advantages and disadvantages.

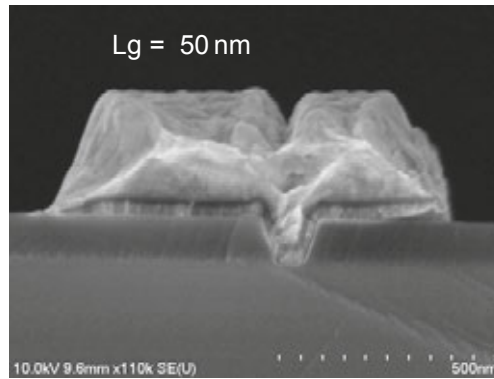
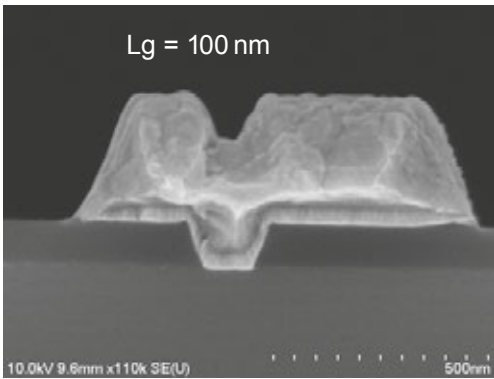
The first approach combines plasma and wet-chemical etching. After lithographically defining the trench, an anisotropic plasma etch is used to form a shallow trench in the upper part of the nitride layer first. Then, after resist stripping, the nitride is thinned and removed from the bottom of the trench by means of an isotropic wet-chemical etch. The resulting slope of the slant depends on the remaining  $\text{SiN}_x$  thickness after the initial shallow trench etching. This process sequence avoids any plasma damage of the semiconductor interface. Fig. 1 shows a cross section of a 280 nm gate; the slant and the conformal metal coverage are obvious. The output characteristics depicted in Fig. 2 are typical for 280 nm gate length, which proves the feasibility of the process.

A second approach bases on the reflow of ZEP 520A e-beam resist followed by plasma etching. The thermal reflow of the resist results in a profile rounding and in an increased robustness during plasma etching. Temperature and duration of the reflow process determine the shrinking of the feature size and the slope of the sidewall in the resist opening. During plasma etching, the shape of the resist will be transferred into the nitride. The sidewall angle can be reproducibly set between 55 and 75 degrees. Gate dimensions down to 50 nm have been realized using a highly anisotropic dry etch process. Fig. 3 presents SEM images of various Ir/Au gates fabricated on GaAs test wafers. Down to 50 nm long gates the trench sidewalls provide conformal trench coverage. As shown in Fig. 4, diode characteristics of 250 nm gate transistors indicate that the new process provides excellent Schottky contacts with leakage current levels far below 1 nA/mm and a barrier height of 1.1 eV, which is characteristic for Ir/GaN Schottky contacts. DC output characteristics and S-parameter meas-

▼ **Fig. 1.** Slanted gate fabricated by combining plasma and wet-chemical etching.



▲ **Fig. 2.** Typical output characteristics of  $2 \times 50 \mu\text{m}$  devices on n-type SiC.  $V_{\text{gate}}$  was increased in steps of 1V from -3V to 1V.

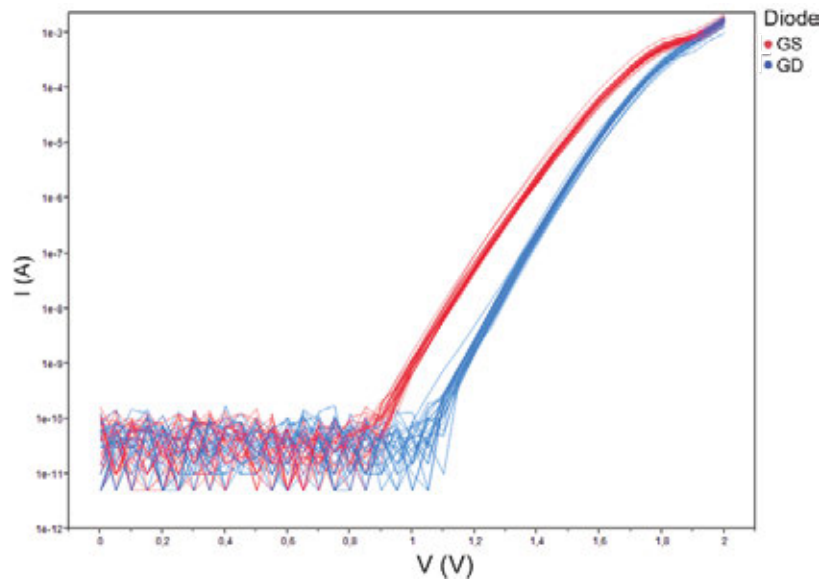


◀ **Fig. 3.** SEM images of cross sections of gates fabricated using resist mask reflowed at 155 °C.

▼ **Fig. 4.** Superimposed forward characteristics of 25 gate/source and gate/drain Schottky diodes.

urements of such transistors processed on sapphire substrates are comparable to standard transistors featuring embedded gates with vertical sidewalls. The drain current characteristics exhibit excellent uniformity over the 3 inch wafer indicating high process conformity.

In conclusion, two process sequences for slanted gate formation have been successfully tested. Slanted gates with dimensions down to 50 nm have been realized, paving the way for detailed investigations on device level. Thus, the new gate modules are ready for integration into GaN-based HEMT and MMIC technology.



#### ZUSAMMENFASSUNG

Ein kritischer Schritt bei der Herstellung von Hochleistungsfeldeffekttransistoren ist die Herstellung des Gates, da das Gate die Hochfrequenzschalteigenschaften und die Zuverlässigkeit stark mitbestimmt. Das FBH arbeitet an der Weiterentwicklung und Verbesserung der Prozesstechnik der Gateherstellung. Dabei werden zwei Ansätze verfolgt, die es erlauben, geneigte Gateflanken in Siliziumnitrid herzustellen, die gut mit Metall gefüllt werden können. Beim nasschemischen Ansatz erfolgt mit einem anisotrop ätzenden Plasma nur eine Teilöffnung des Gategrabens, die dann mit einem isotrop ätzenden nasschemischen Schritt abgeschlossen wird. Bei dem anderen Ansatz wird nur mit einem anisotrop ätzenden Plasma gearbeitet und die Neigung der Flanken über eine Variation der Dicke der Ätzmaske erreicht. Diese Dickenvariation wird durch ein langsames, gezieltes Rundschmelzen des Photolackes nach der Lithografie und vor dem Beginn der Plasmaätzung erzielt.

#### PUBLICATIONS

A. Thies, N. Kemf, S. A. Chevtchenko, O. Krüger, "Formation of slanted gates for GaN-based HEMTs by combined plasma and wet chemical etching of silicon nitride", International Conference on Compound Semiconductor MANufacturing TECHNOLOGY (CS MANTECH 2013), New Orleans, USA, May 14–16<sup>th</sup>, paper 112 (2013).

K. Y. Osipov, W. John, N. Kemf, S. A. Chevtchenko, P. Kurpas, M. Matalla, O. Krüger, J. Würfl, "Fabrication technology of GaN/AlGaN HEMT slanted sidewall gates using thermally reflowed ZEP resist and CHF<sub>3</sub>/SF<sub>6</sub> plasma etching", International Conference on Compound Semiconductor MANufacturing TECHNOLOGY (CS MANTECH 2013), New Orleans, USA, May 14–16<sup>th</sup>, paper 041 (2013).

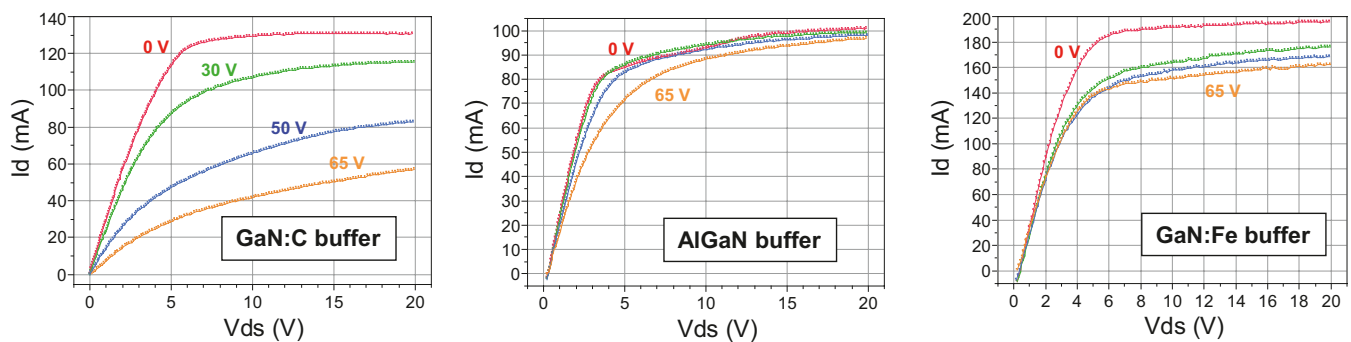
## REDUCED DYNAMIC ON-STATE RESISTANCE OF POWER GAN FETs DUE TO BUFFER ENGINEERING

GaN-based high-voltage switching transistors enable particularly efficient power converters due to their low area-specific on-state resistance and low gate capacitance. Due to lower losses per switching cycle, GaN-based converters can operate at higher frequencies than converters with silicon-based switches, enabling more compact and light-weighted converters. Several 100 V blocking voltage and on-state resistances of a few 100 m $\Omega$  or even less are needed for kW-range power converters. A GaN-based switching transistor from FBH with 155  $\mu\text{m}$  gate width and 11  $\mu\text{m}$  gate-drain separation needs 10 mm<sup>2</sup> chip area and can be used to block 300 V in the off-state. In on-state, its resistance is only  $R_{\text{ON}} = 80 \text{ m}\Omega$  and allowing up to 75 A current to pass, see Fig. 1.

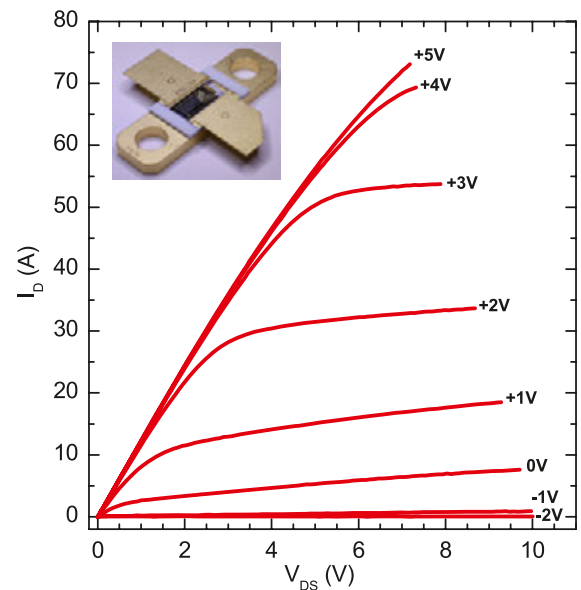
For the targeted high device power density, a high material breakdown strength of the GaN or AlGaN buffer is needed. This can be achieved by the composition of the buffer layers and by doping. Transistors with a voltage blocking strength per gate-drain distance of > 100 V/ $\mu\text{m}$  have been realized on the basis of a carbon-doped GaN buffer (GaN:C), but only 40 V/ $\mu\text{m}$  could be achieved using an AlGaN buffer.

GaN transistors often suffer from an increased on-state resistance (also called dynamic  $R_{\text{ON}}$ ). If the devices are biased in off-state and are switched on, the on-state resistance immediately after switching is much higher than compared to its static value. Charging of GaN material and semiconductor passivation under high electric fields at off-state condition are the root causes. The injected charges remain inside the device structure after the transistor is switched to on-state and thus reduce the electron concentration in the transistor. This phenomenon compromises the transistor's fast switching capability. Similar to voltage blocking, the (Al)GaN buffer properties are again crucial.

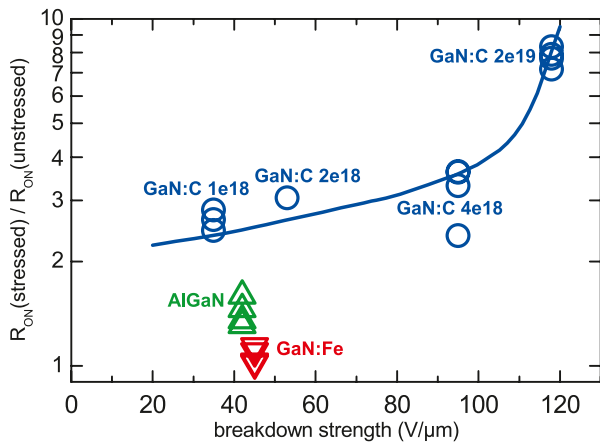
To compare transistors with different buffer compositions in terms of their dynamic on-state resistance properties pulsed on-state IV curves have been taken. All monitoring points of the IV characteristics were measured by pulsing from a stable off-state bias point between 0 V and 65 V over a 0.2  $\mu\text{s}$  time period. A strong reduction of the device on-state current with increasing off-state bias voltage is characteristic for the GaN:C buffer device, while this effect is significantly lower for the AlGaN buffer as well as the iron-doped GaN buffer (GaN:Fe), see Fig. 2.



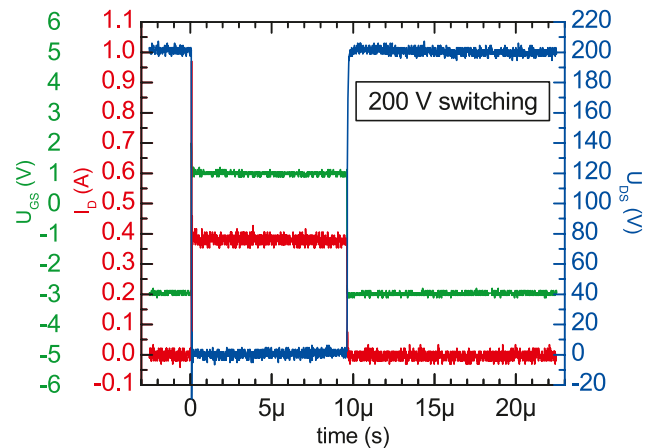
▲ **Fig. 2.** Pulsed on-state IV curves of GaN transistors from different off-state bias drain voltages for 3 devices with different (Al)GaN buffer types. The on-state pulse time is 0.2  $\mu\text{s}$  at varying off-state drain voltages. A significant decrease in I-V slope (= on-state resistance) with increasing off-state drain voltage is observed for the GaN:C-buffer device.



▲ **Fig. 1.** Output characteristic of a 80 m $\Omega$ /300 V GaN switching transistor. Inset: 10 mm<sup>2</sup> chip in A0191 package.



▲ **Fig. 3.** Dynamic  $R_{ON}$ -increase vs. voltage blocking strength for different GaN buffer compositions. Devices based on carbon-doped buffers (blue) with given carbon concentration in  $\text{cm}^{-3}$ , with AlGaIn buffer (green) and with iron-doped buffer (red). Stressed devices have been measured from 65 V off-state drain bias, unstressed from 0 V.



▲ **Fig. 4.** 200 V/0.4 A switching transient of a 0.25 mm wide GaN test transistor with GaN:Fe buffer: gate voltage (green), drain voltage (blue), drain current (red).

Plotting the dynamic  $R_{ON}$ -increase for the 65 V off-state bias point against the breakdown strength for different buffer compositions (Fig. 3) reveals that carbon doping generally gives very high dynamic on-state resistances. High C-doping concentrations yield devices with excellent voltage-blocking properties of 118 V/ $\mu\text{m}$  but the dynamic  $R_{ON}$  is 8-times higher as compared to the un-biased off-state. Reducing the carbon doping-concentration to  $1\text{e}18 \text{ cm}^{-3}$  reduces the dynamic  $R_{ON}$ -increase to a factor of 3, but also the breakdown strength is strongly reduced. Devices based on AlGaIn buffer or GaN:Fe buffer show with  $\sim 40 \text{ V}/\mu\text{m}$  a similar breakdown strength as low-doped GaN:C buffer devices, but their dynamic  $R_{ON}$  is increased only by 10–50 %.

In switching applications, a high dynamic on-state resistance can only get compensated by larger devices, which would again result in increased switching losses due to device capacitances scaling up with device size. Using a buffer that enables lower dynamic  $R_{ON}$ -increase and accepts a compromised breakdown strength is thus the better choice. From the GaN buffer compositions analyzed here, the iron-doped buffer gives the best choice for switching applications, offering 43 V/ $\mu\text{m}$  device breakdown strength at a dynamic  $R_{ON}$ -increase of only 10 %. In fact, the 200 V/0.4 A switching transient with a small GaN:Fe-based test transistor with only 0.25 mm gate width (Fig. 4) demonstrate fast switching with almost no voltage drop in on-state.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Für leistungselektronische Anwendungen hat das FBH Hochspannungs-Schalttransistoren mit 155 mm Gateweite, 300 V Sperrspannung und 80 m $\Omega$  Einschaltwiderstand entwickelt. Der maximale Pulsstrom für den 10 mm<sup>2</sup> großen Chip beträgt 75 A. Der eingesetzte kohlenstoffdotierte GaN-Puffer (GaN:C) weist eine sehr hohe Sperrfähigkeit von  $> 100 \text{ V}/\mu\text{m}$  auf, verursacht aber im Schaltbetrieb mit hohen Sperrspannungen einen erhöhten dynamischen Einschaltwiderstand. Eine geringere Kohlenstoffkonzentration kann diese Erhöhung begrenzen, allerdings sinkt dann auch die Sperrfähigkeit des Puffers auf  $40 \text{ V}/\mu\text{m}$ . Eine wesentlich geringere Erhöhung des dynamischen Einschaltwiderstands demonstrieren Transistoren die auf Epitaxiестrukturen mit einem eisendotierten GaN-Puffer (GaN:Fe) oder einem AlGaIn-Puffer aufgebaut sind. Sie zeigen dann bei 200 V Schaltexperimenten keinen nennenswerten Spannungsabfall im eingeschalteten Zustand und erreichen eine Sperrfähigkeit des Puffers von ebenfalls  $40 \text{ V}/\mu\text{m}$ .

#### PUBLICATIONS

O. Hilt, E. Bahat-Treidel, E. Cho, S. Singwald, J. Würfl, "Impact of Buffer Composition on the Dynamic On-State Resistance of High-Voltage AlGaIn/GaN HFETs", Proc. 24<sup>th</sup> Int. Symp. on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Bruges, Belgium, Jun. 3–7, pp. 345–348 (2012).

O. Hilt, F. Brunner, E. Cho, A. Knauer, E. Bahat-Treidel, J. Würfl, "Normally-off High-Voltage p-GaN Gate GaN HFET with Carbon-Doped Buffer", Proc. Int. Symp. on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), San Diego, CA, May 23–26, pp. 239–242 (2011).

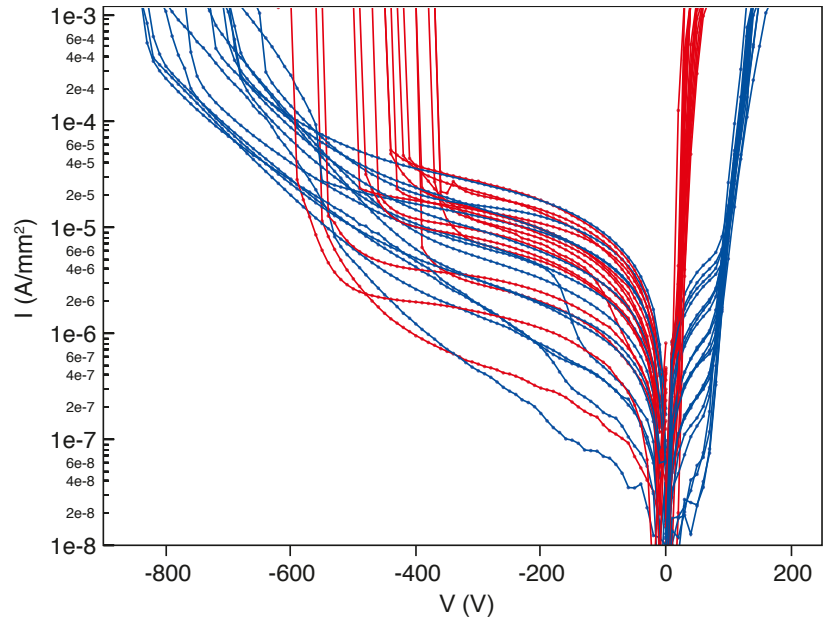
## IMPROVED HIGH VOLTAGE PROPERTIES BY PRE-EPI SUBSTRATE IMPLANTATION

GaN-based transistors are considered as promising candidates for power switching due to their high ratio between breakdown voltage  $V_{BR}$  and on-state resistance  $R_{ON}$  and low switching losses. They are thus highly attractive for a great variety of industrial high-power applications as, for example, for power conversion and battery management in electrical cars. The lateral devices take benefit from the small gate charge and the high electron mobility and density in the 2-dimensional electron gas (2DEG) placed at the hetero-interface between the AlGaIn barrier layer and the GaN channel layer.

Current state-of-art GaN-HEMTs are mostly grown on semi-insulating silicon carbide (SiC) substrates, which are costly and therefore limit the market penetration of this technology. One way to improve the price-performance ratio for GaN-based devices is to reduce the expenses for the substrates. Using silicon substrates would reduce costs drastically. As they suffer from an approximately three times lower thermal conductivity, heat removal from the device would be significantly compromised. As trade-off, n-doped SiC can be used as substrate, which is more cost-efficient than semi-insulating SiC due to its bigger market share and features the same thermal conductivity as semi-insulating SiC. The drawback of conductive n-SiC substrates is that the full device blocking voltage drops across the buffer layer thickness only, giving a limitation to the maximum device breakdown strength.

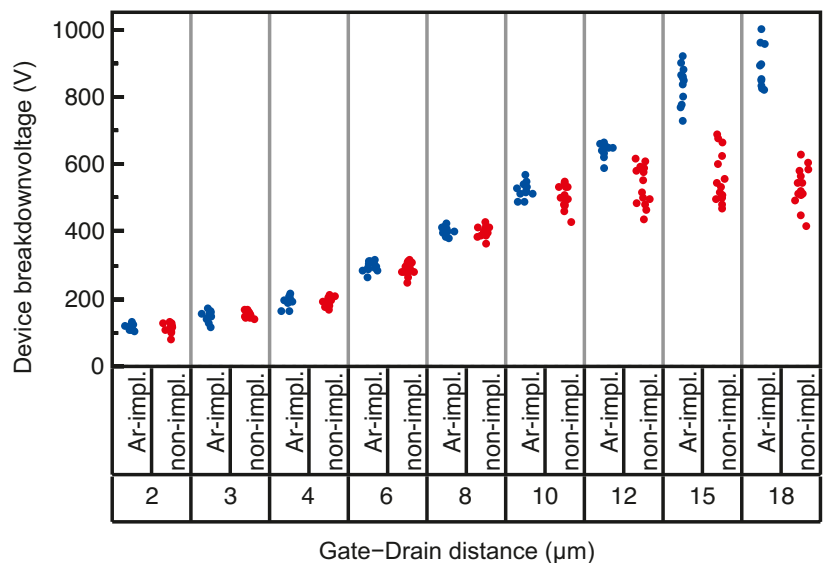
Due to the internal field distribution in GaN HEMTs, their breakdown voltage should generally scale with gate-drain separation. However, on conductive substrates the vertical device leakage current through the buffer layer gradually increases with device blocking voltage and dominates device off-state drain current at high drain voltage levels. Breakdown due to this vertical current is then independent from gate-drain separation and the scaling is lost.

At FBH, a new technique to increase the breakdown voltage of GaN-devices grown on n-SiC was developed. Key feature is to decrease the vertical leakage by special means. Therefore, the substrates were implanted with argon before epitaxy. Fig. 1 shows the comparison of the vertical device leakage currents for non-implanted and argon-implanted wafers. While the vertical blocking increases from ~50 V to ~150 V with positive polarity, the effect is much more pronounced in the negative range. There, the blocking voltage increases from ~400 V to > 600 V. Therefore, the device breakdown voltage rises correspondingly; vertical leakage becomes dominant at much higher drain volt-



▲ Fig. 1. Vertical leakage currents for wafers with (blue) and without (red) substrate implantation.

▼ Fig. 2. Device-breakdown voltage scaling: implanted (blue) and non-implanted (red) wafers.

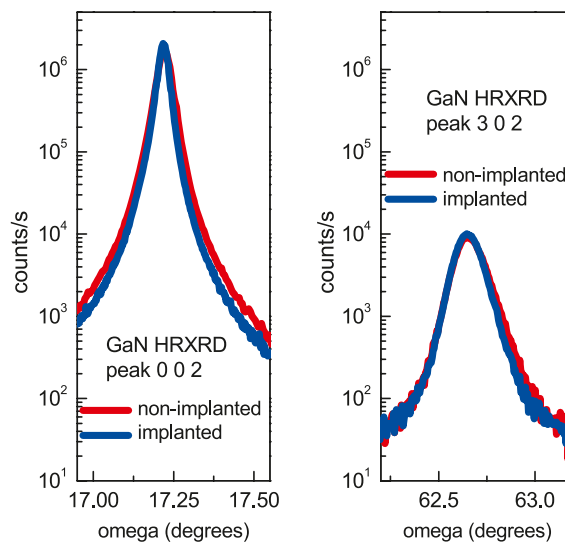


age levels, which is shown in Fig. 2. Instead of breakdown voltage saturation at about 500 V, the usable voltage range for devices fabricated on pre-implanted n-SiC substrates goes up to more than 800 V. The increase of the vertical voltage capability can be explained by reduced electrical conductivity in the implanted layers in the upper part of the n-SiC substrate. This boosts the resistance between the epitaxy structure and the conductive layers of the substrate and therefore increases the device breakdown voltage.

The results are in good agreement with theoretical calculations of vertical breakdown voltage improvement. From these simulations the thickness of the damaged SiC layers was deduced and multiplied by the breakdown field strength of semi-insulating SiC.

Rendering the upper SiC layers isolating by ion implantation may lead to increased structural disorder on the SiC-substrate surface which, in turn, may affect the epitaxial growth process after implantation. To check this, high-resolution x-ray diffraction measurements (HRXRD) have been accomplished directly after epitaxial growth on implanted and non-implanted n-SiC substrates which were used for device fabrication. Fig. 3 summarizes the results of the HRXRD measurements showing the widths of the GaN-buffer-related reflection peaks of a HRXRD analysis of the epi-grown sample surfaces. Comparing the HRXRD-reflection peaks of the buffer of substrate-implanted with non-substrate-implanted wafers did not show any peak broadening for GaN buffer layers grown on pre-implanted Sn-SiC surfaces. This means that, no signs of a degradation of the GaN-buffer quality due to the substrate implantation have been found.

In conclusion, pre-epitaxial substrate implantation reproducibly improved vertical breakdown of GaN-based epi-structures grown on conductive n-SiC. This increases the device breakdown and enables device scaling up to larger gate-drain distances compared to devices grown on non-implanted substrates. As a consequence, cheaper n-SiC substrates can be used instead of expensive semi-insulating SiC substrates for GaN-based power switching devices where high breakdown voltages are needed.



◀ Fig. 3. Omega-2Theta scans of the GaN layers for non-implanted (blue) and implanted (red) AlGaN for the 002 peak (left) and the 302 peak (right).

#### ZUSAMMENFASSUNG

GaN-HEMTs werden aufgrund ihres sehr guten Verhältnisses von Durchbruchspannung zu Einschaltwiderstand immer attraktiver für Anwendungen in der Leistungselektronik. Diese nutzen meist semiisolierendes Siliziumkarbid (SiC) als Substrat – das Material ist jedoch teuer und erhöht somit die Kosten für das gesamte Bauelement. Eine Möglichkeit in Richtung einer preisgünstigeren Technologie ist die Verwendung leitfähiger SiC-Substrate. Dabei kann, je nach Potenzial des Substrats, die komplette Drainspannung an der Bufferstruktur anliegen, was allerdings große Anforderungen an die vertikale Spannungsfestigkeit des Buffers stellt. Am FBH wurde daher eine neue Technologie entwickelt, die die Spannungsfestigkeit von GaN-HEMTs auf leitenden SiC-Substraten signifikant erhöht. Dazu werden die n-leitenden SiC-Substrate vor der Epitaxie implantiert und die elektrische Leitfähigkeit der oberen Schichten des leitfähigen Substrats somit deutlich reduziert. Dies wiederum verbessert, je nach den gewählten Implantationsparametern, die Hochspannungsfestigkeit von GaN-HEMTs auf leitfähigem SiC um bis zu 300 V.

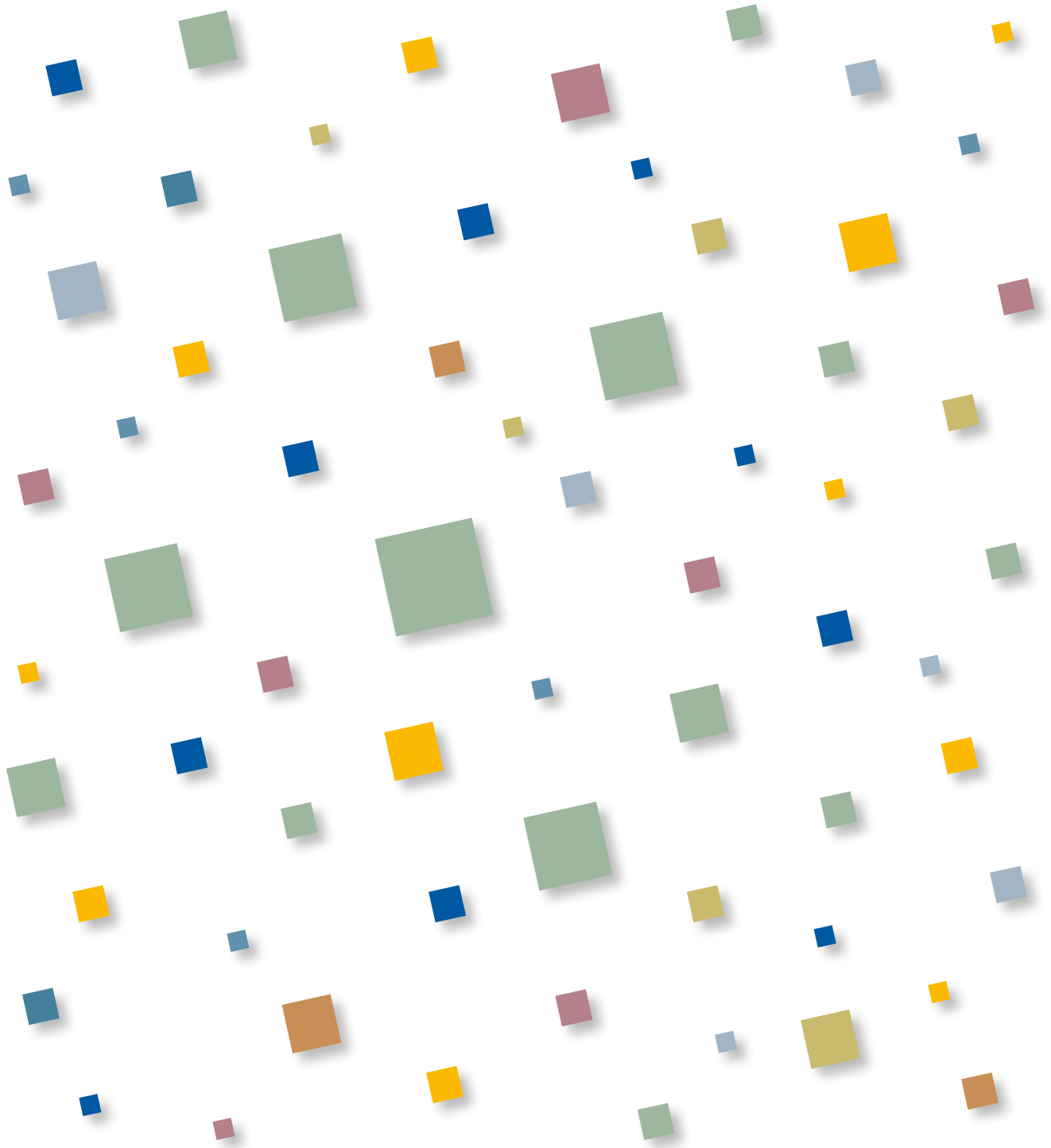
#### PUBLICATION

P. Kotara, R. Zhytnytska, E. Cho, A. Thies, E. Bahat-Treidel, O. Hilt, J. Würfl, G.Tränkle, "Improvement of vertical breakdown using pre-epitaxial implantation on n-SiC substrates", WOCS-DICE, 28.–30.5.2012, Porquerolles (2012).





# DIODE LASERS DIODENLASER



# DIODENLASER

Das Ferdinand-Braun-Institut ist eine der weltweit führenden Forschungseinrichtungen in der Chip-Technologie für hochbrillante Diodenlaser vom roten bis zum nah-infraroten Spektralbereich (630 nm...1180 nm). Zunehmend gewinnt der nächste Integrationsschritt, die Entwicklung von anwendungsorientierten Laserstrahlquellen, für die Forschungsarbeiten am FBH an Bedeutung. Die hybride Integration maßgeschneiderter Diodenlaserchips mit aktiven und passiven Bauelementen auf einer mikrooptischen Bank führt zu neuartigen, benutzerfreundlichen und besonders kompakten Lasermodulen. Damit macht das FBH die Fortschritte im Design und bei der Realisierung von Diodenlaserchips binnen kurzer Zeit marktreif. Das Institut bleibt dadurch mit seiner anwendungsorientierten Forschung auch langfristig konkurrenzfähig. Zumal die Zahl der Anwendungen weiter steigt und den zunehmenden Einfluss der optischen Technologien in Industrie und Forschung widerspiegelt.

Mit seinen Kompetenzen deckt das FBH den gesamten Teil der Wertschöpfungskette ab: von Simulation und Entwurf über die technologische Realisierung der Halbleiterchips bis zum Aufbau einsatzfähiger Diodenlasermodule. Die Schwerpunkte der Arbeiten im Jahr 2012 lagen bei der Entwicklung von maßgeschneiderten Diodenlaserchips höchster Effizienz und mit spezifischen Wellenlängen. Diese sind auch die Basis für Hochleistungs-Laserstrahlquellen, die in Kooperation und im Auftrag von Industriepartnern als hybrid-integrierte, kompakte Lasermodule entwickelt werden. Sie kommen in vielfältigen Applikationen zum Einsatz, wie etwa in der Raman-Spektroskopie, der optischen Freiraumkommunikation, der Atomspektroskopie und bei Kurzpulsanwendungen in der Materialbearbeitung. Spektral stabilisierte Diodenlaser bei 633 nm wurden zudem erfolgreich an industrielle Kooperationspartner transferiert. Deutliche Fortschritte wurden bei der besonders anspruchsvollen Qualifikation kompakter Lasermodule für die Raumfahrt erzielt. Damit legt das FBH zugleich die Basis für weitere Forschungsaufträge und Projekte in diesem Bereich.

Herausragende Ergebnisse des Jahres 2012 waren:

- Demonstration einer hybriden MOPA-Diodenlaserstrahlquelle mit 17 W nahezu beugungsbegrenzter Leistung bei einer spektralen Breite kleiner 30 pm,
- Laserbarren mit 2 J Pulsenergie im QCW-Betrieb (1,7 kW Spitzenleistung, 1,2 ms Pulsbreite, 10 Hz Wiederholrate),
- Demonstration einer ps-Lichtpulsquelle mit 4 nJ Pulsenergie und Wiederholraten im MHz-Bereich auf Basis von Diodenlaserchips kombiniert mit schneller GaN-Elektronik,
- Stabiler 2-Wellenlängenbetrieb eines Diodenlaser bei 670 nm und 670,5 nm für die Ramanspektroskopie (SERDS),
- Laserbarren, die in enger Kooperation mit Industriepartnern entworfen und realisiert wurden, mit Ausgangsleistungen über 200 W im CW-Betrieb und mehr als 60 % Effizienz im Arbeitspunkt,
- Kompakte und robuste Diodenlasermodule mit extrem schmaler intrinsischer Linienbreite (< 1 kHz) für Weltraumanwendungen.

# DIODE LASERS

The Ferdinand-Braun-Institut is one of the world-leading research centers for the chip technology of high-brilliance diode lasers, spanning the wavelength range from 630 nm to 1180 nm. Recently, the next integration step gains increasing importance within FBH's research program: the development of customized laser sources for specific applications. Hybrid integration of tailored inhouse-developed diode laser chips together with active and passive devices on micro-optical benches leads to novel, user-friendly, and especially compact laser modules. Thus, FBH brings its state-of-the-art know how in chip technology to the market within short time. This way, the application-oriented institute remains competitive in the long-term, especially considering that the number of applications continuously tends upwards. This fact also reflects the increasing impact of optical technologies on industry and research.

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. The focus of developments in 2012 was on tailored chips for high-power diode laser sources with specific wavelengths and highest conversion efficiency. These chips provide, at the same time, the basis for customized hybrid-integrated compact laser modules that are developed in close cooperation with industrial partners. Such modules are used in a great variety of applications, such as Raman spectroscopy, atomic spectroscopy, optical free space communication, and short-pulse materials processing. Furthermore, spectrally stabilized 633 nm diode lasers with excellent properties were successfully transferred to industry. Significant progress was also achieved in the qualification process of compact laser modules for space applications, which is particularly challenging. More importantly, this know-how and technological developments establish the basis to expand activities in this field.

Outstanding results in 2012:

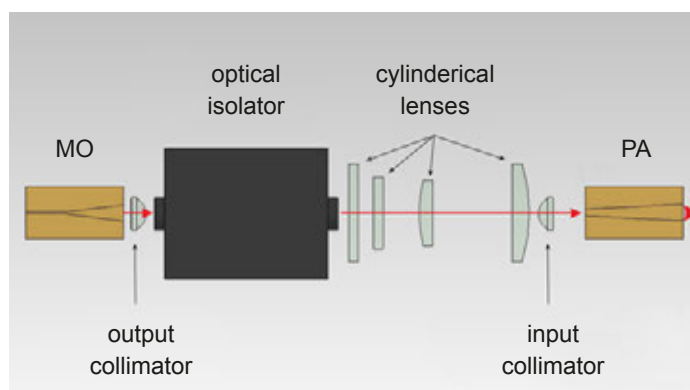
- Demonstration of record values for 17 W nearly diffraction-limited output power and a spectral width of only 30 pm based on a MOPA system,
- Laser bars delivering 2 J pulse energy in QCW operation (1.7 kW peak power, 1.2 ms pulse width, 10 Hz repetition rate),
- Demonstration of ps pulse source based on diode lasers with 4 nJ pulse energy, a repetition rate up to the MHz range using inhouse-developed electronic GaN components for fast current excitation,
- Stable operation of a two-wavelength diode laser chip emitting at 670 nm and 670.5 nm developed for Raman spectroscopy,
- Laser bars delivering more than 200 W output power with 60 % power conversion efficiency. These results were achieved in close cooperation with industrial partners,
- Compact and robust diode laser modules with extremely small intrinsic linewidth ( $< 1$  kHz) for space applications.

## NEWLY OPTIMIZED POWER AMPLIFIERS ENABLE HIGHLY BRILLIANT SEMICONDUCTOR LIGHT SOURCES

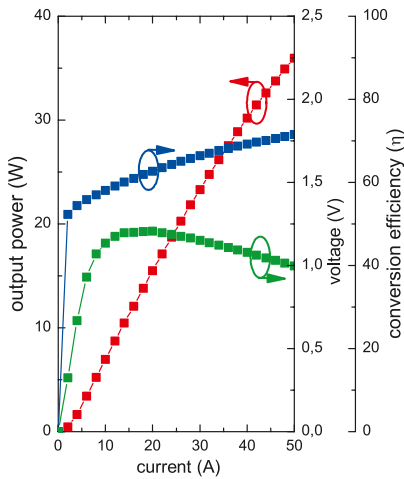
An ongoing challenge in the development of semiconductor laser light sources is to simultaneously realize high output power, stabilized narrow spectral width, and near-diffraction-limited beam quality. As such sources are continuously improved, they will increasingly find direct application in material processing, as well as in display and medical technologies. Semiconductor master oscillator power amplifier (MOPA) systems are a promising technology that has the potential to achieve very high performance. A MOPA system consists of a master oscillator (MO), delivering a nearly diffraction-limited beam with a relatively low optical power, and a separate power amplifier (PA), which boosts the low output power of the MO without dramatically deteriorating its beam quality. In a MOPA system, MO and PA can be separately optimized, potentially enabling higher performance than from monolithically integrated laser sources.

During 2012, FBH scientists have demonstrated further advances in GaAs-based MOPA technology, emitting at a wavelength of 970 nm. The developments made use of high-performance PA designs to deliver 17 Watt optical power in a diffraction-limited beam from a single semiconductor element for the first time world-wide. The PA design utilized a carefully optimized vertical structure with low optical loss and a tailored modal gain. This gain must provide sufficient amplification for high-power operation without degrading beam quality. Specifically, excessive gain will rapidly amplify small disturbances in the beam profile, leading to a filamentary profile with poor beam quality. However, low gain suppresses power and efficiency. In the lateral direction, the PA was constructed with a truncated-tapered profile, which FBH scientists have found enables both high output power and good beam quality, partially due to its large surface area (high amplification, good cooling). In the lateral direction, the PA was constructed with a truncated-tapered profile, which enables both high output power and good beam quality. The MO was a low-power grating-stabilized single-mode laser with a spectral width of  $< 30$  pm. The experimental configuration is illustrated in Fig. 1. The beam from the MO is coupled into the PA via various optical elements, with its profile reshaped to reach an optimal coupling efficiency. An optical isolator is used to prevent any feedback interfering with the MO. All testing was performed under quasi-continuous-wave (QCW) conditions (pulse width of 100  $\mu$ s, frequency 100 Hz).

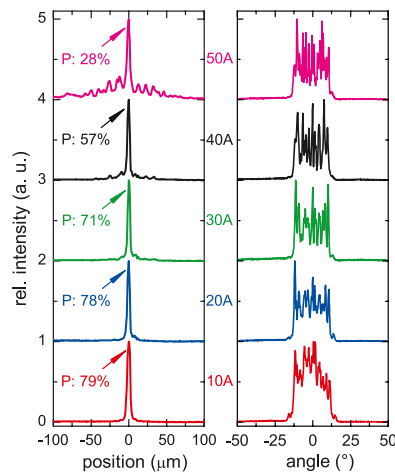
In the final configuration, a total optical output power of more than 35 W was achieved within a narrow spectral band of  $< 30$  pm. 17 W of the output (more than half) was emitted into a diffraction-limited beam (in-plane beam propagation factor  $M^2$  ( $1/e^2$ )  $< 1.9$ ). At higher bias, beam quality degraded due to the development of filaments. The in-plane amplifier geometry was found to play a significant role in determining amplifier performance: a larger surface area leads to more effective cooling, yielding not only higher output power, but also superior beam quality. To reach higher performance, larger surface area, namely longer device length (for instance 6 mm) is likely to be needed. This will also enable lower modal gain to be used, as preferred for optimal beam quality.



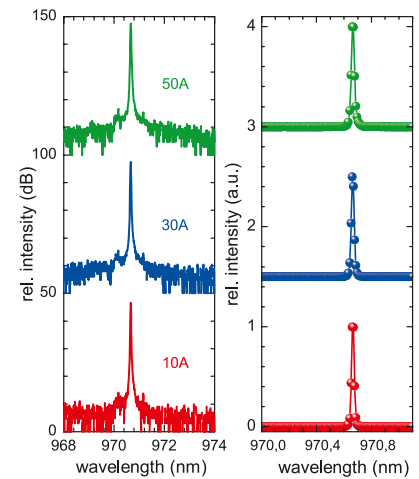
▲ **Fig. 1.** Top view of the experimental setup including: master oscillator (MO), power amplifier (PA), optical isolator, aspheric lenses (in- and output collimators), and cylindrical lenses for beam shaping.



▲ **Fig. 2.** The QCW output power, voltage and conversion efficiency as a function of current for the amplifier. Input power was 0.8 W.



▲ **Fig. 3.** Profiles of the beam waists (left) and far fields (right) of from the PAs at diverse bias currents, with indicated power contents in central lobes.



▲ **Fig. 4.** Integrated spectrum at 30 W output power.

In further developments, compact MOPA-based systems are now planned that are optimized for CW operation. This means in particular that the power conversion efficiency must be increased, and the optical components need to be miniaturized. This optimization process will lead to semiconductor MOPA systems being very attractive for use in commercial applications. This work was partly supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) program "Grundlagen für Diodenlaser der Nächsten Generation (13N9154)" and by the German Research Foundation (DFG) program, SFB 787-C5.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Eine der aktuellen Herausforderungen bei Halbleiterlasern ist es, hohe optische Leistungen im Wattbereich mit beugungsbegrenzter Strahlqualität und spektral stabilisierter, schmalbandiger Emission zu kombinieren. Mit „Master-Oszillator Power-Amplifier (MOPA)“-Systemen konnten diesbezüglich wesentliche Fortschritte erzielt werden. Durch Optimierungen in den Epitaxie-Schichtstrukturen für die Wellenführung und der Anzahl von Quantenfilmen ist es gelungen, mehr als 17 W beugungsbegrenzte optische Leistung aus einzelnen Verstärkern unter „Quasi-Continuous Wave (QCW)“-Betrieb zu erreichen. Die spektrale Bandbreite liegt dabei bei unter 30 pm. Weitere Entwicklungen sollen derartige Halbleiterlaserlichtquellen noch kompakter machen und für den CW-Betrieb optimieren. Damit werden die MOPA-Systeme überaus attraktiv für den Einsatz in kommerziellen Anwendungen in der Materialbearbeitung, Display- und Medizintechnologie.

#### PUBLICATIONS

X. Wang, G. Erbert, H. Wenzel, B. Eppich, P. Crump, A. Ginolas, J. Fricke, F. Bugge, M. Spreemann, G. Tränkle, "17-W Near-Diffraction-Limited 970-nm Output From a Tapered Semiconductor Optical Amplifier", IEEE Photonics Technology Letters., vol. 25, no. 2 (2013).

X. Wang, G. Erbert, H. Wenzel, B. Eppich, P. Crump, A. Ginolas, J. Fricke, F. Bugge, M. Spreemann, G. Tränkle, "High-power, spectrally stabilized, near-diffraction limited 970 nm laser light source based on truncated-tapered semiconductor optical amplifiers with low confinement factors", Semicond. Sci. Technol., vol. 27, no. 1, p. 015010 (2012).

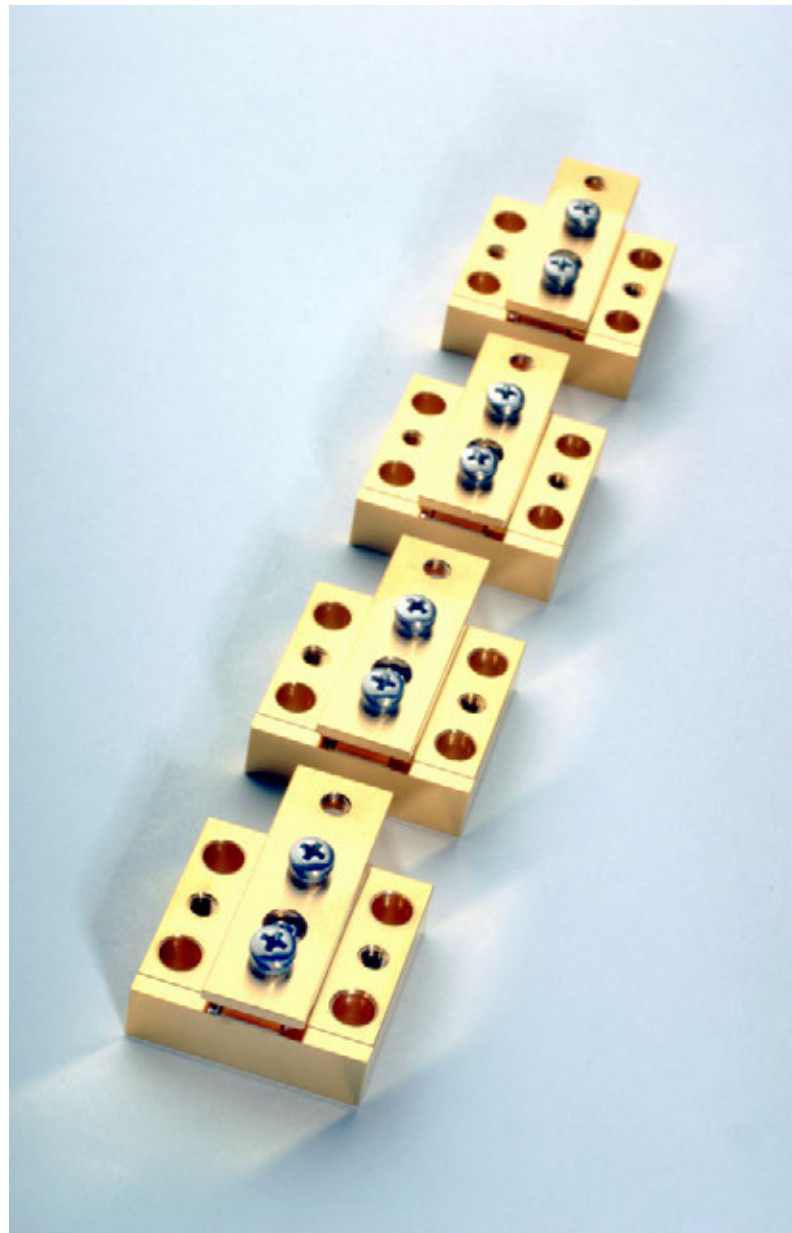
## DIODE LASER BARS REACH 1.7 kW AT $-50^{\circ}\text{C}$

Broad-area diode lasers are the most efficient sources of optical energy, delivering large optical output powers at high conversion efficiency. These devices are widely used in direct material processing applications and as pump sources for solid state, fiber, and gas lasers. Higher power per bar increases the total delivered power density, enabling both higher performance systems and new applications. In addition, it leads to a lower overall cost per Watt. Both lower cost and higher power density are of particular interest to groups developing high-energy-class diode-pumped solid state laser systems (HEC-DPSSL) that are currently used for basic research and require very high pump powers, i.e. large numbers of laser bars. Such HEC-DPSSL systems also have the potential to be used as low-carbon energy sources, where high energy laser pulses are employed to initiate fusion. In this case, laser bars with the very highest conversion efficiencies at the operation point are also crucial, to maximize the net power generation.

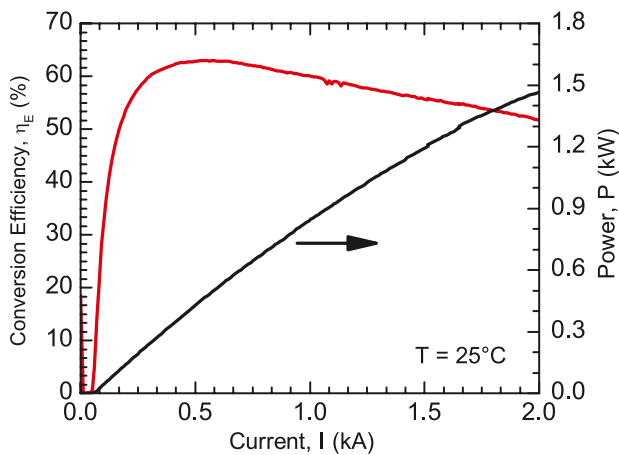
FBH scientists are currently working to address this challenge, within the Leibniz-Association project CryoLaser that started in January 2012. This new project makes use of the fact that semiconductor properties improve as the operation temperature is reduced, leading to lower threshold current and improved slope. Specifically, the goal of CryoLaser is to leverage this improvement in material characteristics at temperatures below  $0^{\circ}\text{C}$  to enable a breakthrough in bar power and efficiency. Studies are being performed that target the two most important pump wavelengths, namely 872 nm and 940 nm for Nd-doped and Yb-doped solid-state media respectively.

Initial CryoLaser studies have assessed 1 cm laser bars, initially focusing on sources close to 940 nm. The bars were mounted on a passively cooled heatsink, as shown in Fig. 1. For maximum applicability, test conditions relevant for pumping Yb:YAG crystals were used throughout, namely quasi-continuous-wave (QCW) operation, with 1.2 ms pulse width and 10 Hz repetition rate. In these initial tests, 1 cm laser bars with a cavity length of 6 mm and a fill factor of 72 % were found to deliver 1.7 kW of peak optical power at an operating temperature at  $-50^{\circ}\text{C}$ , limited by the available current. This corresponds to a peak pulse energy of 2 J per bar, which represents the highest power from a single bar ever reported. At  $25^{\circ}\text{C}$ , the bar delivered a peak power of 1.5 kW, limited by thermal rollover.

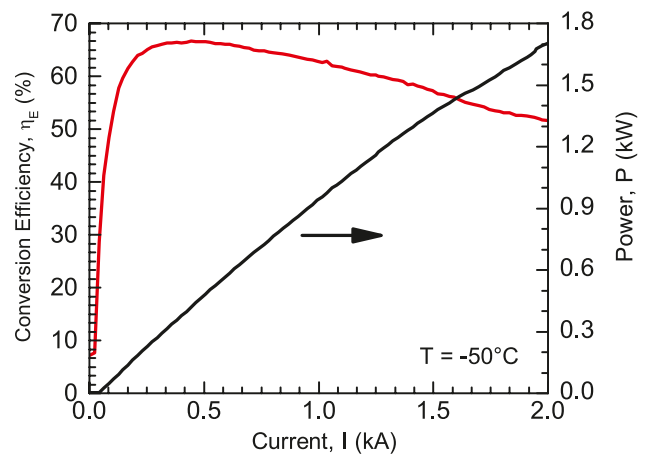
The 1.7 kW laser bars contained 18 single emitters, each with  $400\ \mu\text{m}$  contact width. The facets were passivated, then coated with low (0.5 %) and high (98 %) reflectivities to form front and back facets respectively. Subsequently, the bars were mounted between two CuW submounts and attached p-side down onto a conduction-cooled-pack-age (CCP) with hard solder. The CCP was located in an insulated chamber and was passively cooled using silicone oil, whose temperature was regulated using a commercial



▲ Fig. 1. Packaged bars on CCP mount.



▲ **Fig. 2.** Efficiency and optical output power to 2 kA QCW (1.2 ms 20 Hz) for a single CryoLaser bar at heatsink temperature of 25 °C.



▲ **Fig. 3.** Efficiency and optical output power to 2 kA QCW (1.2 ms 20 Hz) for a single CryoLaser bar at heatsink temperature of -50 °C.

chiller. Power was measured referenced to national standards. The bars were biased using a commercial current supply and the voltage was measured via separate cables across the CCP in an ohmic configuration. The prototype bar packaging used in these initial studies was found to add an additional series resistance of 0.26 m $\Omega$ . When this is subtracted, the bar efficiency can be determined, with peak values of 63 % at 25 °C and 67 % at -50 °C. Efficiency remained > 60 % to over 1 kW at -50 °C.

In their ongoing studies, the FBH team is pursuing bars with further improved conversion efficiency, via improvements to the vertical structure. Progress has been reported at an invited talk at CLEO / QELS in June 2013. This work is supported by the Leibniz association under contract SAW-2012-FBH-2.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Weltweit arbeiten Wissenschaftler an einer neuen Generation von Laseranwendungen mit extrem hohen Leistungen, wie etwa der laserinduzierten Fusion. Diese erfordert neuartige Diodenlaser mit maximal möglicher optischer Leistungsdichte und Effizienz zum Pumpen von Festkörperkristallen. Im Rahmen des Leibniz-Projektes „CryoLaser“ werden am FBH Laserdioden für diese Anforderungen entwickelt. Halbleiterlaser zeigen bei Temperaturen unter 0 °C verbesserte Eigenschaften wie eine niedrigere Schwelle und eine größere Steigung in der Leistungskurve. Optimierungen der vertikalen Schichtstruktur für den Betrieb in diesem Temperaturbereich führen zu zusätzlichen Leistungs- und Effizienzsteigerungen. Im ersten Schritt wurden neuartige 1-cm-Laserbarren mit hohem Füllfaktor und einer Emissionswellenlänge um 970 nm hergestellt. Diese erreichen im Quasi-Dauerstrich-Modus (1,2 ms Pulsbreite, 10 Hz Wiederholrate) optische Spitzenleistungen von 1,7 kW pro Barren bei -50 °C, was einer Pulsenergie von 2 J entspricht. Dies ist die höchste Leistung, die jemals aus einem solchen Laserbarren erzielt wurde.

#### PUBLICATIONS

P. Crump, G. Erbert, H. Wenzel, C. Frevert, C.M. Schultz, K-H. Hasler, R. Staske, B. Sumpf, A. Maaßdorf, F. Bugge, S. Knigge, G. Tränkle, "Efficient High-Power Laser Diodes", IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron., vol. 19, no. 4, pp. 1501211, (2013).

P. Crump, "CryoLaser: Innovative Cryogenic Diode Laser Bars Optimized for Emerging Ultra-high Power Laser Applications", CLEO: Applications and Technology, Special Symposium on High Power Diode Laser Arrays, June 9–14, San Jose, CA, USA, p. JW1J.2 (2013).

P. Crump, C. Frevert, H. Wenzel, G. Erbert, G. Tränkle, "CryoLaser: Innovative Cryogenic Diode Laser Bars Optimized for Emerging Ultra-high Power Laser Applications", Proc. 7<sup>th</sup> annual HEC-DPSSL Workshop, Sept. 12–14, Lake Tahoe, CA, USA (2012).

## HIGH-PEAK POWER OPTICAL PS-PULSE SOURCES BASED ON MONOLITHIC MASTER-OSCILLATOR POWER AMPLIFIERS

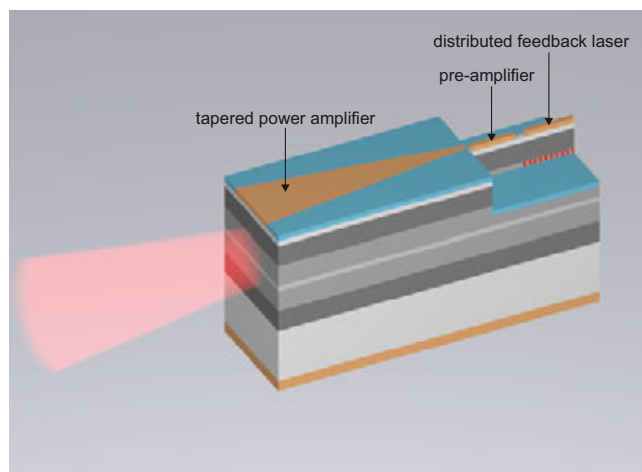
Pulsed laser sources find many applications in fields such as material processing, sensors, and analytics (e.g. fluorescence spectroscopy) and therefore offer a big market potential. With diode lasers, light pulses down to the picosecond range can be easily generated by injecting short electrical current pulses into the cavity. The semiconductor technology utilized to fabricate diode lasers additionally enables cost-effective mass-production. However, for many applications the peak power in the Watt range generated with single diode lasers is too small.

In order to increase the peak power, the FBH developed miniaturized modules with a footprint of  $4 \times 5 \text{ cm}^2$ , which hybridly integrate a laser diode, an optical amplifier, micro lenses for optical beam shaping and high-frequency electronics. Modules generating wavelength-stabilized, nearly diffraction-limited optical pulses in the picosecond and nanosecond ranges have been realized. They deliver high peak-powers of several tens of Watts by mode locking, Q switching and gain switching. However, the mounting of the components requires a precision in the sub- $\mu\text{m}$  range and is very time-consuming. Therefore, monolithic integration of a diode laser and an amplifier on a single semiconductor chip offers a cost-effective alternative.

The MOPA device that has now been developed on this basis is schematically shown in Fig. 1. It consists of a distributed-feedback ridge-waveguide laser (1 mm) acting as master oscillator (MO), a ridge waveguide pre-amplifier (1 mm) and a tapered gain region (4 mm) acting as power amplifier (PA). The epitaxial layer structure of the whole device is based on an asymmetric super-large cavity, where the active region consisting of a double quantum well is placed asymmetrically in a  $4.8 \mu\text{m}$  broad AlGaAs waveguide core. This results in a vertical far-field divergence of only  $15^\circ$  (FWHM).

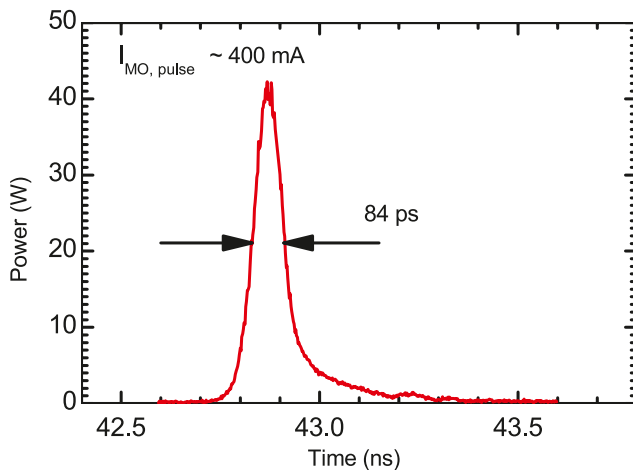
The MO contains a sub-micrometer scale Bragg grating, fabricated by holographic photolithography, wet-chemical etching, and two-step epitaxy. This grating provides the feedback for laser action and fixes the emission wavelength. The pre-amplifier separates the MO and the PA spatially from each other in order to avoid undesired effects of feedback from the PA into the MO. Both, rear and front facets were anti-reflection coated. The ridge-waveguide is designed to support only the fundamental transversal mode, thus providing an excellent beam quality.

Light pulses are generated by injecting short electrical current pulses in the nanosecond range into the MO. In contrast to previous research, where the power amplifier was operated in CW mode, the PA is driven with ns-current pulses here, too. This avoids self-heating of the amplifier and generates less amplified spontaneous emission (ASE). In order to achieve the desired optical amplification, the current pulses must have an amplitude of more than 10 A, achieved with an in-house developed driver circuit based on GaN transistors. The electrical current injected into the pre-amplifier driven in CW mode can be used to shape the light pulses generated in the MO. Fig. 2 shows the temporal shape of the light pulses emitted by the MOPA. The small pulse width of 84 ps has been obtained by carefully adjusting the delay time between the current pulses—with lengths of 4 ns and 2 ns, respectively—into MA and PA as well as the current of 3.7 mA injected into the pre-amplifier.

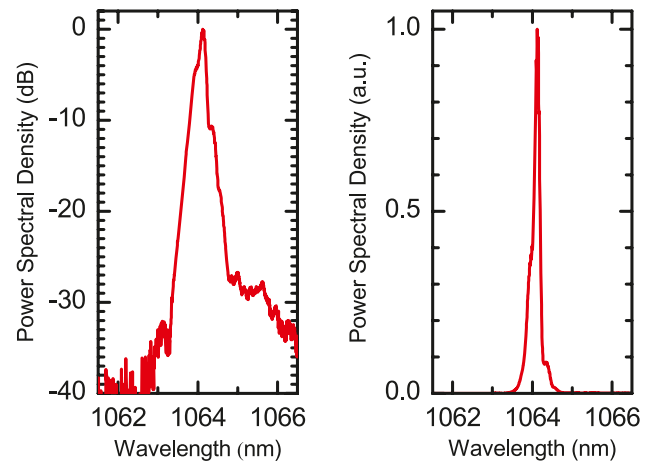


▲ Fig. 1. Schematic view of the monolithic pulse source.





▲ Fig. 2. Optical power measured as function of time.



▲ Fig. 3. Temporal-averaged optical spectrum.

The peak power as high as 42 W corresponds to the pulse energy of 4 nJ. The related optical spectrum is shown in Fig. 3 on logarithmic (left) and linear scales (right). The optical spectrum shows a spectral line near 1064 nm. The spectral power density of the background caused by ASE is by a factor of 1,000 (30 dB) smaller than the power density of the line. The spectral line width is 160 pm.

Thus, FBH succeeded to develop an optical ps-pulse source based on a monolithically integrated master-oscillator power-amplifier. The compact module emits a high optical output power of several tens of Watts in a nearly diffraction-limited beam at a stabilized emission wavelength of 1064 nm. The extension to other wavelengths is straightforward.

This work was supported by the German Ministry for Education and Research (BMBF) within the project "FaZiT" (contract FKZ 13N9670).

#### ZUSAMMENFASSUNG

Viele Anwendungen, etwa in der Materialbearbeitung, in der Sensorik und der Analytik benötigen leistungsstarke gepulste Laserlichtquellen. Diese müssen spektral stabilisierte und beugungsbegrenzte Laserimpulse mit Zeitdauern im Picosekunden- und Nanosekunden-Bereich aussenden. Für diesen Zweck wurde am FBH eine Laserlichtquelle entwickelt, welche eine DFB-RW-Laserdiode und einen optischen trapezförmigen Halbleiterverstärker auf einem Chip monolithisch integriert. Die Lichtimpulse entstehen im DFB-Laser durch Injektion von kurzen Strom-Impulsen aus einer am FBH entwickelten elektronischen Verstärkerschaltung auf der Basis ultra-schneller GaN-Transistoren. Der optische Halbleiterverstärker wird ebenfalls gepulst betrieben, um dessen Erwärmung und das Entstehen von verstärkter spontaner Emission zu vermeiden. Mit dem Halbleiterchip konnten 84 ps lange Lichtimpulse mit einer Wellenlänge um 1064 nm, einer spektralen Breite von 160 pm und einer Spitzenleistung von 42 W erzeugt werden.

#### PUBLICATIONS

H. Wenzel, A. Klehr, S. Schwertfeger, A. Liero, T. Hoffmann, O. Brox, M. Thomas, G. Erbert, G. Tränkle, "Compact sources for the generation of high-peak power wavelength stabilized laser pulses in the picoseconds and nanoseconds ranges", Proceedings SPIE, vol. 8241, p. 82410V-1 (2012).

H. Wenzel, S. Schwertfeger, A. Klehr, D. Jedrzejczyk, Th. Hoffmann, G. Erbert, "High peak power optical pulses generated with a monolithic master-oscillator power amplifier", Optics Letters, vol. 37, p. 1826 (2012).

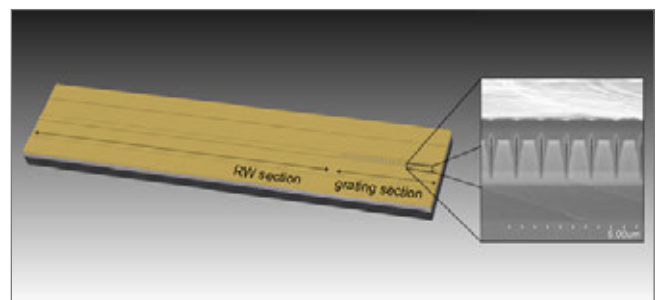
## DBR LASERS EMITTING AT 633 NM AS AN ALTERNATIVE FOR HE NE LASERS IN METROLOGY

For more than 30 years, helium-neon (HeNe) lasers are well-established and widely used light sources in laser metrology and Raman spectroscopy. Due to their high beam quality, narrow linewidth, and emission in the visible range at 632.8 nm, these lasers find many applications in industrial equipment. HeNe lasers are, for example, crucial components in projection lithography tools fabricating semiconductor chips. However, they suffer from some drawbacks: HeNe lasers are about as big as cigar cases and thus relatively bulky. Additionally, the tunability of wavelength is limited, electro-optical conversion efficiency is below 1%, and power supply requires high voltage. Thus, it is highly desirable to replace HeNe lasers by compact semiconductor diode lasers. As many applications are determined to the 632.8 nm, this wavelength is prespecified. Moreover these diode lasers need to provide a stable narrow linewidth and an excellent beam quality comparable to those of HeNe lasers. In the last years, progress was achieved with red-emitting diode lasers, but the requirements concerning linewidth and wavelength stability could not be fulfilled so far.

Now, scientists from the FBH successfully integrated distributed Bragg reflectors (DBR) into state-of-the-art, red-emitting diode lasers. These wavelength-selective laser mirrors make devices with the desired spectral properties possible. Work started with design development and simulation, which resulted in an epitaxial layer structure and corresponding demands on the geometry to realize efficient Bragg reflectors. To be compatible with industrial processing single-step epitaxy and i-line projection lithography are critical requirements. So, a higher order surface grating was chosen for the Bragg reflector. FBH thus implemented a tenth-order grating resulting in periods of about 970 nm. A particularly developed  $\text{BCl}_3$ -reactive ion etching process was used to transfer the grating from the resist pattern on the surface into the epitaxial structure of the semiconductor wafer. He-cooling of the wafer backside was applied to ensure a very narrow grating trench necessary for high reflectivity of the DBR. The surface grating was encapsulated with a dielectric to prevent oxidization and enable epi-side down mounting. Additional 7.5  $\mu\text{m}$  wide stripes were etched by  $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ -reactive ion etching to form a lateral ridge waveguide, which makes single-mode operation with good beam quality possible. The total length of the devices is 2 mm, with a grating length of 0.5 mm and an actively pumped section of 1.5 mm length. All further technological steps, like metallization, scribing, cleaving, and the facet process are part of standard edge emitter processing.

DBR-RWLs of that kind were separated to a chip size of 2 mm  $\times$  400  $\mu\text{m}$ . The facets of devices were passivated to achieve the long-term stability. The facets acting as mirrors were coated to obtain a reflectivity of 30% at the front facet mirror. The back-side facet behind the DBR was coated for about 0.1% reflectivity. This anti-reflection coating guarantees that only the reflectivity of the DBR is active for the laser, thus ensuring a more stable spectral emission. The unusually high front facet reflectivity was chosen to improve the resonator quality, ex-

▼ **Fig. 1.** Red-emitting diode laser on C-mount.



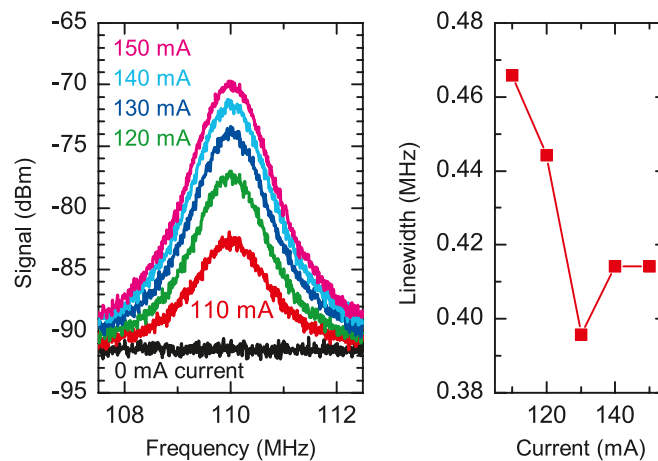
▲ **Fig. 2.** Drawing (not to scale) of a diode laser featuring an active ridge waveguide and a DBR-grating section. Inset: SEM cross-section of epitaxial structure with integrated DBR surface gratings.

pecting a lower linewidth. The devices were soldered epi-side down on a CVD-diamond heat spreader and then mounted on a C-mount. All devices were characterized in continuous wave operation.

The diode lasers emit at the desired wavelength around 633 nm. At a heat sink temperature of 15 °C an optical output power of more than 20 mW could be achieved. The devices operate in a single spectral mode with a side-mode suppression ratio of more than 25 dB. This value is limited by the measurement equipment. In order to deduce the linewidth of the lasers, self-delayed heterodyne measurements were performed. We measured the linewidth that corresponds to the full width at half maximum of the profile. The beat note spectra at laser driving currents were measured from 110 mA to 150 mA in steps of 10 mA. Over the full range, spectral linewidths below 1 MHz could be obtained. This value corresponds to a coherence length of more than 100 m. The beam profiles show an almost diffraction-limited Gaussian shape, resulting in an excellent beam quality sufficient for efficient single-mode fiber coupling and interferometry applications.

The electrical power consumption is less than 250 mW. Thus, battery operation for possible mobile application can be easily achieved. A first lifetime test at 15 °C with an output power of 14 mW showed a mean time to failure of more than 6,000 h. It can therefore be expected that further tests demonstrate the feasibility for industrial applications.

In general, the results prove the beneficial use of our newly-developed diode lasers with internal DBR as an alternative for HeNe lasers. Additionally, the use of such a monolithic device enables new applications in areas for which HeNe lasers, so far, are too large, too fragile, and too hazardous with their high voltages.



▲ Fig. 3. Self-delayed heterodyne linewidth measurement: beat note spectra (left); deduced linewidth over current (right).

## ZUSAMMENFASSUNG

Helium-Neon (HeNe)-Laser sind etablierte Lichtquellen, die u.a. in der Lasermetrologie und Raman-Spektroskopie weit verbreitet sind. Allerdings ist ihre Wellenlänge nur begrenzt durchstimmbare, die elektro-optische Konversionseffizienz ist mit < 1% gering und sie benötigen Hochspannungsversorgung. Kompakte Diodenlaser sind daher eine vielversprechende Alternative – bislang reichten jedoch deren Linienbreite und Wellenlängenstabilität nicht aus. Nun wurde am FBH ein Diodenlaser entwickelt, der bei 633 nm emittiert und die erforderlichen spektralen Eigenschaften liefert. Dazu wurde ein Bragg-Reflektor auf Basis industriekompatibler Herstellungsverfahren entwickelt und implementiert. Der Diodenlaser erreicht damit eine optische Ausgangsleistung von mehr 20 mW und Linienbreiten < 1 MHz. Da der Leistungsbedarf mit weniger als 250 mW gering ist, sind sogar mobile Anwendungen möglich. Erste Lebensdauertests belegen die Zuverlässigkeit.

## PUBLICATIONS

G. Blume, M. Schiemangk, J. Pohl, D. Feise, P. Ressel, B. Sumpf, A. Wicht, K. Paschke, "Narrow linewidth of 633 nm DBR ridge-waveguide lasers", IEEE Photonics Technology Letters 25, pp. 550–552 (2013).

D. Feise, G. Blume, J. Pohl, B. Sumpf, H. Thiem, M. Reggentin, J. Wiedmann, K. Paschke, "Sub-MHz linewidth of 633 nm diode lasers with internal surface DBR gratings", in Proc. SPIE 8640-9, SPIE, San Francisco, California, USA, pp. 86400A-1-9 (2013).

D. Feise, W. John, G. Blume, C. Kaspari, J. Fricke, K. Paschke, G. Erbert, "Red-emitting diode lasers with internal surface DBR gratings", Proc. SPIE 8277-7, SPIE, San Francisco, California, USA, pp. 827708-1-11 (2012).

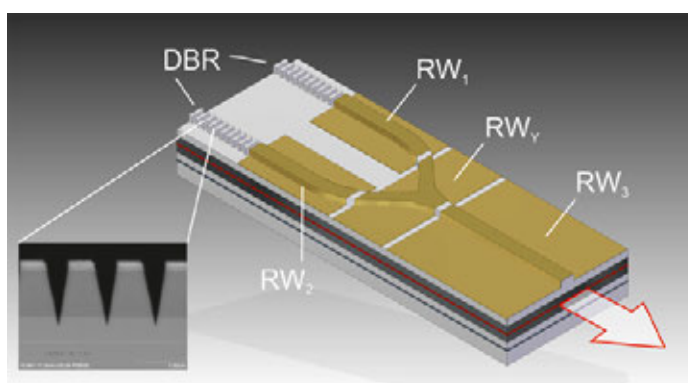
D. Feise, W. John, F. Bugge, G. Blume, T. Hassoun, J. Fricke, K. Paschke, G. Erbert, "96 mW longitudinal single mode red-emitting DBR ridge waveguide laser with tenth order surface gratings", Opt. Lett. 37(9), 1532-1534 (2012).

## DUAL-WAVELENGTH DIODE LASERS AT 671 NM FOR SHIFTED EXCITATION RAMAN DIFFERENCE SPECTROSCOPY

Analysis of materials and substances in food monitoring, medicine, and environment becomes increasingly important in everyday life, just as the awareness to stay healthy and to improve quality of life gains influence. For nearly all such applications, Raman spectroscopy, which is based on an inelastic optical scattering process, is a versatile tool. If the sample material is irradiated by light of one wavelength, a small amount of light shifted to other wavelengths is generated. This Raman spectrum is a very specific "fingerprint"—unique for every substance. Diode lasers are well established excitation light sources for Raman spectroscopy. Due to these compact devices the share of portable sensors systems like handheld devices has rapidly grown, thus bringing Raman spectroscopy out of the laboratory. Still, there are challenges: The Raman signal is quite weak and often covered by strong fluorescence light, especially for organic and biological samples. Moreover, ambient light can disturb the Raman signals during in situ measurements. To separate Raman signals from a disturbing background Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS) is a promising technique. Two excitation wavelengths are used, hence generating two slightly shifted Raman spectra. However, the background light remains mainly constant and the signal can be separated by subtracting both spectra. For SERDS, a laser light source is necessary that provides two excitation wavelengths  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  with a sufficient spectral distance of about  $10\text{ cm}^{-1}$ , e.g. for the investigation of solid and liquid samples. In a previous project, hybrid microsystems light sources based on diode lasers with an emission at 671 nm suitable for SERDS have already been successfully demonstrated. The compact laser sources were assembled on a micro bench with a footprint of  $20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  using two gain chips and an external spectral selective cavity consisting of micro lenses and volume Bragg gratings.

Now, the Ferdinand-Braun-Institut miniaturized this concept further by realizing a monolithic dual-wavelength distributed Bragg reflector (DBR) diode laser with an emission at 671 nm. The device size is reduced to a footprint of only  $3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ . Two laser cavities are integrated into one chip. A scheme is shown in Fig. 1. A laser structure with deeply etched surface tenth order DBR gratings is designed and realized to provide two emission lines with the necessary spectral spacing of about  $0.45\text{ nm}$  ( $10\text{ cm}^{-1}$ ) at 671 nm. These DBR mirrors are realized using a resist pattern generated by an i-line wafer stepper and a specific developed dry etching process. This is a very flexible procedure to fabricate different grating periods for diode lasers emitting at various wavelengths on one wafer. The inset in Fig. 1 shows a SEM picture of such a surface DBR grating. The laser light is guided via ridge waveguides with a stripe width of  $5\text{ }\mu\text{m}$  and is superimposed in a Y-branch coupler to realize one output aperture at the front facet. This guarantees a common excitation spot in Raman experiments, which is necessary especially for heterogeneous samples. Separate electrical contacts ( $RW_1$ ,  $RW_2$ ,  $RW_Y$ ,  $RW_3$ ) allow, moreover, an independent control for both emissions.

For both laser wavelengths, an output power of 110 mW at an injection current of 400 mA is achieved. Over this operating range, optical spectra are measured with a spectral resolution of 9 pm. The results are given in a false color contour plot in Fig. 2, containing the spectra of both laser cavities. The intensity of each spectrum is normalized to one. The laser shows an emission at 670.57 nm and 671.02 nm for  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  at 110 mW, respectively. Over the whole



▲ **Fig. 1.** Scheme of a dual wavelength Y-branch DBR diode laser at 671 nm, separate electrical contacts at  $RW_1$ ,  $RW_2$ ,  $RW_Y$ ,  $RW_3$ . Inset: SEM picture of a  $10^{\text{th}}$ -order DBR grating.

operating range, the laser operates in single mode—the mean spectral distance between both emission lines is  $10.2 \text{ cm}^{-1}$  as targeted. The spectral width is  $\Delta\lambda = 26 \text{ pm}$  ( $0.6 \text{ cm}^{-1}$ ) containing 95 % of the optical power. The sidemode suppression ratio is larger than 40 dB at 50 mW. These spectral properties make the device well-suited as excitation light source for Raman spectroscopy. With respect to SERDS, the laser can be applied at different output powers that can be adjusted according to the properties of the substance under study.

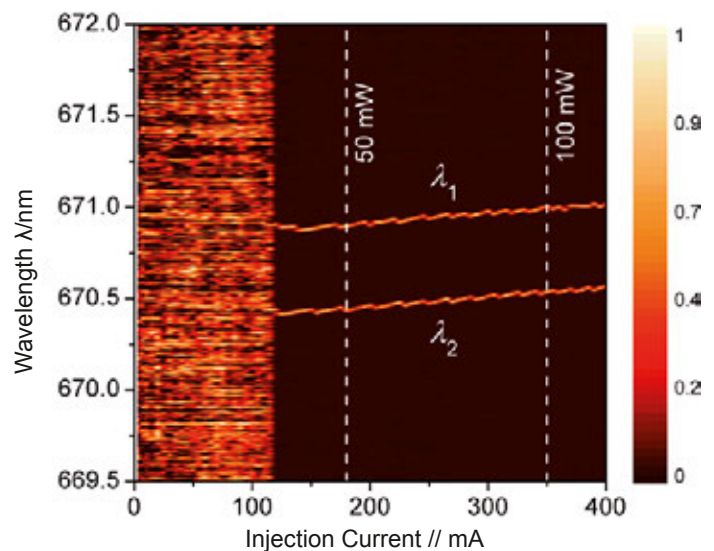
The capabilities of this diode laser were experimentally assessed in a Raman spectroscopic set-up. Fig. 3a) shows a Raman spectrum of polystyrene (PS) in the so-called “fingerprint” spectral region excited with a dual-wavelength laser. A broadband light source is used to generate a disturbing background signal. All weak Raman lines are covered and only the strong line at  $999 \text{ cm}^{-1}$  is visible with a signal-to-background noise of  $S/\sigma_B = 70$ . This complicates the analysis especially for unknown substances. A second Raman spectrum is measured with the second excitation wavelength and both spectra are subtracted. Using an integration algorithm the derivative-like signal distribution is reconstructed and presented in Fig. 3b). Here, all Raman lines of PS are clearly visible and resolved. With  $S/\sigma_B = 1800$  a 25-fold improvement of the signal-to-background noise is achieved.

In summary, these experiments demonstrate that the monolithic dual-wavelength Y-branch diode laser at 671 nm is well-suited as excitation light source for mobile SERDS sensor systems. This opens new perspectives for Raman spectroscopy in real-world applications. Moreover, this concept can be transferred to other wavelengths and applications requiring two wavelengths operation.

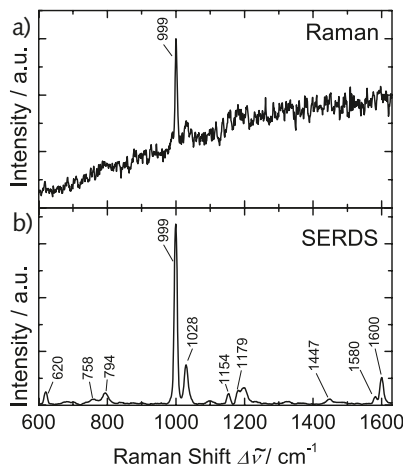
This work is supported within the DiLaRa project by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), VIP program under contract 03V0207.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Raman-Spektroskopie ist ein etabliertes Verfahren, das sich besonders für die Materialanalytik und zum Nachweis von Substanzen in der Lebensmittelüberwachung, Medizin und Umwelt eignet. Diodenlaser sind dabei als Anregungslichtquellen etabliert. Da die äußerst schwachen Raman-Signale häufig von Hintergrundlicht oder Fluoreszenz überdeckt werden, nutzt das FBH die Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS)-Methode. Damit können Raman-Linien von Störsignalen getrennt werden. Hierzu wurde am FBH eine neuartige monolithische Lichtquelle entwickelt, die auf zwei eng benachbarten Wellenlängen emittiert. Dieser Y-DBR-Diodenlaser ist nur  $3 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$  groß und verbindet zwei Laserresonatoren mit einem Y-Koppler. Dank tief geätzter DBR-Gitter zehnter Ordnung werden die benötigten Wellenlängen mit einem spektralen Abstand von etwa  $0,45 \text{ nm}$  bereitgestellt. Die kompakte Quelle erreicht bei  $671 \text{ nm}$  Leistungen von bis zu  $100 \text{ mW}$ ; die Verbesserung des Signal-zu-Hintergrund Niveaus wurde nachgewiesen. Sogar der direkte Einsatz in portablen Sensorsystemen ist damit möglich.



▲ Fig. 2. Contour plot of optical spectra versus injection current at a heatsink temperature of  $T = 25 \text{ °C}$ .



◀ Fig. 3. a) Raman spectrum of polystyrene (PS) and b) SERDS spectrum of PS measured with a dual-wavelength diode laser at  $671 \text{ nm}$ .

#### PUBLICATIONS

M. Maiwald, J. Fricke, A. Ginolas, J. Pohl, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, “Dual-wavelength monolithic Y-branch distributed Bragg reflection diode laser at  $671 \text{ nm}$  suitable for shifted excitation Raman difference spectroscopy”, *Laser & Photonics Reviews*, DOI: 10.1002/lpor.201300041, vol. 7, no. 4, pp. L30–L33 (2013).

B. Sumpf, M. Maiwald, “Improving Raman spectroscopy with miniaturized diode lasers”, *SPIE Newsroom*, DOI: 10.1117/2.1201305.004816 (2013).

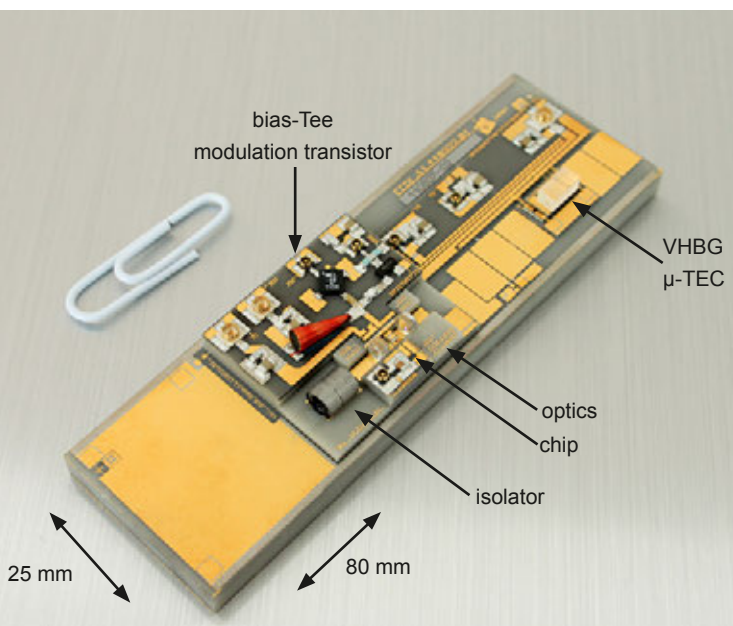
## COMPACT AND ROBUST DIODE LASER MODULES FOR SPACE APPLICATIONS

Quantum sensors based on cold atoms are currently moving into the focus of various fields of application like precision time keeping, geodesy, geo-physics and exploration, navigation, and fundamental physics. Up to now, the operation of these sensors requires an infrastructure that is, in principle, only provided by an optics laboratory. Furthermore, no equipment existed so far which could survive and operate properly under the harsh conditions of a field deployment or even in space. Consequently, the German Space Agency DLR, the European Space Agency ESA, and the European Commission through the EU-FP 7 program fund projects that aim at maturing all aspects of the technology relevant for quantum sensor applications in the field and in space.

FBH is contributing to these activities by developing a hybrid micro-integrated diode laser technology. The corresponding compact laser modules meet the electro-optic (EO) requirements and can, at the same time, cope with the operating conditions determined by the harsh environment. In terms of electro-optical performance, the main challenge common to all cold atom quantum sensor applications is the spectral stability and spectral purity of the laser system. While atom interferometry requires lasers with sub-100 kHz linewidth or a fractional frequency instability less than 1 part in  $10^9$ , the laser linewidth eventually has to be reduced to the sub-1 Hz level (1 part in  $10^{15}$ ) for optical atomic clocks. These EO requirements are complemented by the request for minimum mass, minimum volume, maximum energy efficiency, and maximum resilience against mechanical and thermal stress.

Within a DLR-funded project, FBH has developed suitable compact laser modules for Bose-Einstein condensation and atom interferometry experiments on rubidium atoms. Tests shall be carried out on board a sounding rocket, with a launch in 2014. For that purpose, external cavity diode laser (ECDL) modules have been micro-integrated onto  $50 \times 25 \text{ mm}^2$  AlN ceramic micro-optical benches, see Fig. 1. The modules each comprise a semiconductor laser chip, micro lenses for beam collimation, and a volume holographic grating for frequency selection and spectral stabilization. Volume and mass of these laser systems are reduced by a factor of 100 or more as compared to commercially available systems. The laser system design omits any moveable parts in order to provide the mechanical stability and resilience against random vibration and mechanical shock—a relevant precondition for space applications. FBH laser

systems have successfully passed random vibration tests up to 20 g (root-mean-square, 20 Hz ...2,000 Hz), 1,500 g mechanical shock, and are also in operation at the ZARM drop tower in Bremen. Here, the laser system undergoes accelerations up to 50 g, first upon launch by a catapult and second upon impact onto the ground.



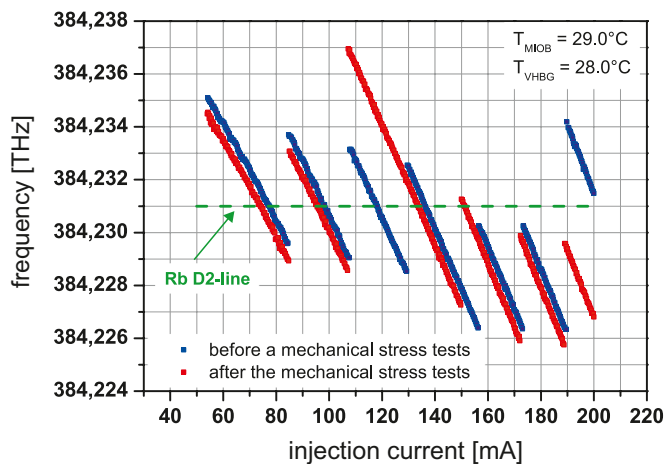
◀ **Fig. 1.** Hybrid micro-integrated extended cavity diode laser module for Rubidium BEC and atom interferometry experiments at the ZARM drop tower and onboard a sounding rocket.

### PUBLICATIONS

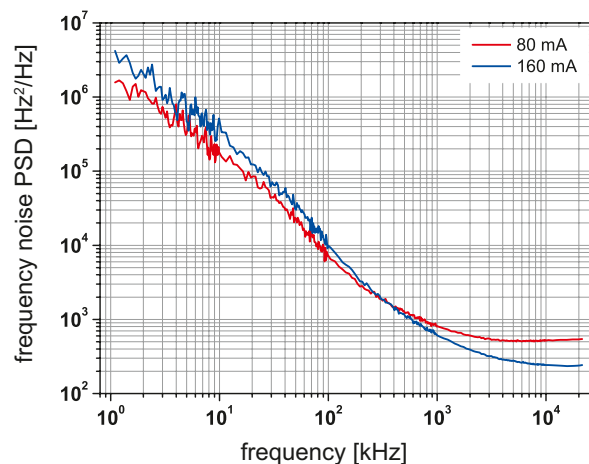
H. Müntinga, H. Ahlers, M. Krutzik, A. Wenzlawski, S. Arnold, D. Becker, K. Bongs, H. Dittus, H. Duncker, N. Gaaloul, C. Gherasim, E. Giese, C. Grzeschik, T.W. Hänsch, O. Hellmig, W. Herr, S. Herrmann, E. Kajari, S. Kleinert, C. Lämmerzahl, W. Lewoczko-Adamczyk, J. Malcolm, N. Meyer, R. Nolte, A. Peters, M. Popp, J. Reichel, A. Roura, J. Rudolph, M. Schiemangk, M. Schneider, S.T. Seidel, K. Sengstock, V. Tamma, T. Valenzuela, A. Vogel, R. Walser, T. Wendrich, P. Windpassinger, W. Zeller, T. van Zoest, W. Ertmer, W.P. Schleich, E.M. Rasel, **"Interferometry with Bose-Einstein Condensates in Microgravity"**, Phys. Rev. Lett., vol. 110, no. 093602 (2013).

E. Luvsandamdin, S. Spießberger, M. Schiemangk, A. Sahm, G. Mura, A. Wicht, A. Peters, G. Erbert, G. Tränkle, **"Development of narrow linewidth, micro-integrated extended cavity diode lasers for quantum optics experiments in space"**, Appl. Phys. B, vol. 111, issue 2 (2013).

Fig. 2 shows how the emission frequency of the laser can be tuned by a variation of the injection current. The results show the behavior before and after mechanical stress tests. The measurements demonstrate that emission wavelength as well as stable single mode emission are not affected by the environmental tests. The lasers reach an output power of typically 40 mW as measured behind an optical isolator (30 dB), which is also integrated into the module and features an insertion loss of typically 3 dB.



▲ Fig. 2. Emission frequency of ECDL vs. injection current before (blue) and after mechanical stress tests (red) at  $20g_{RMS}$  and 1,500 g shock (each all three axis).



▲ Fig. 3. Frequency noise power spectral density of the emission of an ECDL.

The ECDLs further provide an excellent spectral stability. Fig. 3 shows the frequency noise power spectral density derived from a beat note measurement between two nominally identical free-running micro-integrated ECDLs. From the white noise floor of 250 Hz<sup>2</sup>/Hz an intrinsic linewidth of only 390 Hz is inferred. To determine the full-width-at-half-maximum (FWHM) linewidth we frequency-lock one of the ECDLs to the other ECDL with a servo bandwidth of ~6 kHz (170 μs time scale) and record the RF power spectrum of the beat note signal. This reveals a FWHM linewidth of 71 kHz at an injection current of 80 mA.

Micro-integrated ECDLs have also been realized for spectroscopy of the potassium D2 line at 767 nm. Here, a similar electro-optical performance was achieved.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Quantensensoren, die auf kalten Atomen basieren, gewinnen für verschiedene Anwendungen an Bedeutung, etwa für die Präzisionszeitmessung, die Navigation oder fundamentalphysikalische Fragestellungen. Um derartige Quantensensoren zu betreiben, ist bisher ein komplettes optisches Labor erforderlich – für den Außeneinsatz oder gar Weltraumanwendungen gab es bis dato keine geeigneten Geräte. Seit mehreren Jahren arbeitet das FBH an hybrid-integrierten, sehr robusten Diodenlaser-Modulen, deren Formfaktor mit etwa  $50 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$  etwa um den Faktor 100 kleiner ist als der herkömmlicher Lasersysteme. Die Module integrieren Halbleiterlaserchips, Mikrolinsen zur Strahlformung und volumenholografische Gitter zur Frequenzselektion und spektralen Stabilisierung. Sie erfüllen die hohen Anforderungen hinsichtlich spektraler Stabilität und Reinheit – die Linienbreite für optische Atomuhren muss bis in den Bereich  $< 1 \text{ Hz}$  reduziert werden. So hat das FBH u.a. Lasermodule für die Bose-Einstein-Kondensation und Atominterferometrie mit Ausgangsleistungen von 40 mW entwickelt. Sie haben mechanische Stresstests (Vibrationstests bis zu 20g, Schocktests bis 1.500g) und Beschleunigungstests bis 50g erfolgreich absolviert – und damit die Vorbereitungen für Experimente an Bord einer Rakete im Jahr 2014.

#### PUBLICATIONS

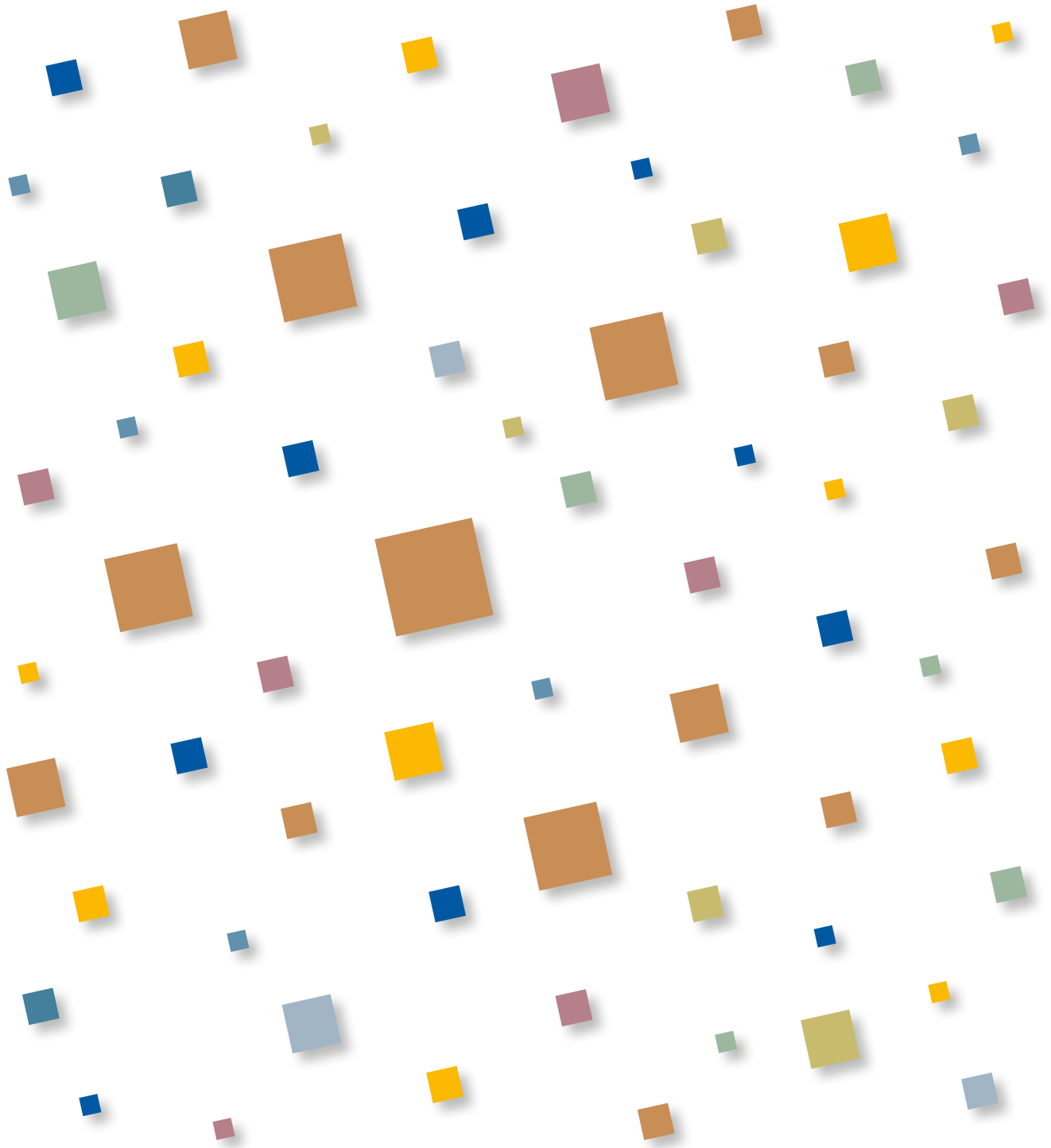
A. Wicht, E. Luvsandamdin, A. Kohfeldt, M. Schiemangk, S. Spießberger, A. Sahm, F. Bugge, J. Fricke, H. Wenzel, A. Peters, G. Erbert, G. Tränkle, "Micro-integrated, high power, narrow linewidth diode lasers for precision quantum optics experiments in space", Photonics West (2012).

T. van Zoest, N. Gaaloul, Y. Singh, H. Ahlers, W. Herr, S.T. Seidel, W. Ertmer, E. Rasel, M. Eckart, E. Kajari, S. Arnold, G. Nandi, W.P. Schleich, R. Walser, A. Vogel, K. Sengstock, K. Bongs, W. Lewoczko-Adamczyk, M. Schiemangk, T. Schuldt, A. Peters, T. Könemann, H. Müntinga, C. Lämmerzahl, H. Dittus, T. Steinmetz, T.W. Hänsch, J. Reichel, "Bose-Einstein Condensation in Micro-gravity", DOI: 10.1126/science.1189164, Science 328, 1540 (2010).





# GAN OPTOELECTRONICS GAN-OPTOELEKTRONIK



## GaN-OPTOELEKTRONIK

Der Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik beschäftigt sich mit der Entwicklung innovativer Lichtquellen auf Basis des Halbleitermaterials Galliumnitrid (GaN) und seiner Legierungen AlGaIn und InGaIn. Diese Materialien sind die Grundlage für hocheffiziente Lichtemitter in einem Spektralbereich, der den gesamten sichtbaren und große Teile des ultravioletten (UV) Spektrums abdeckt. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am FBH konzentrieren sich dabei auf Laserdioden mit Emissionswellenlängen im Bereich von 390–450 nm, Leuchtdioden (LEDs) für den UV-A-, UV-B- und UV-C-Bereich und solarblinde UV-Photodetektoren. Die Laserdioden mit spezifischen Wellenlängen zielen unter anderem auf den Einsatz in der Atom- und Molekülspektroskopie, während die UV-LEDs für Anwendungen wie die Wasserdesinfektion, die Aushärtung von Lacken oder die Phototherapie interessant sind.

Die Bauelemententwicklung reicht von der Modellierung der optischen und elektrischen Eigenschaften von GaN-basierten Schichtstrukturen, dem Wachstum mittels Metallorganischer Gasphasen-Epitaxie (MOVPE) bis zur Chipherstellung im Reinraum. Abschließend werden die Chips auf Wärmesenken bzw. in Gehäuse montiert und die Bauelemente elektrooptisch charakterisiert. Das FBH arbeitet dabei eng mit der Arbeitsgruppe „Experimentelle Nanophysik und Photonik“ der TU Berlin zusammen. Im Rahmen des regionalen Wachstumskerns „Berlin WideBaSe“ gibt es auf dem Gebiet der GaN-Optoelektronik zudem enge Kooperationen mit einer Reihe Berliner Firmen wie etwa Osram, Jenoptik, OSA Opto Light und eagleyard Photonics.

Im Jahr 2012 wurden sowohl die Technologien zur Bauelementherstellung weiter entwickelt als auch das physikalische Verständnis um die Funktionalität der Bauelemente ausgebaut. So konnte beim Design von Rippenwellenleiter-Laserdioden gezeigt werden, dass die starke Abhängigkeit der Laserschwelle von der Rippenätztiefe maßgeblich aus einem hohen „Anti-Index-Guiding“ resultiert. Die Technologien zur Herstellung von Laserdioden mit einer Rippenwellenleiterbreite unter 2 µm wurden weiter stabilisiert. Dadurch wird nun im Wellenlängenbereich zwischen 405 und 440 nm CW-Betrieb mit Ausgangsleistungen über 20 mW demonstriert. Aufbauten dieser Dioden in externen Resonatoren beim Projektpartner eagleyard Photonics erlauben es zudem, die Laserwellenlänge kontinuierlich über 9 nm durchzustimmen.

Im Bereich der UV-LEDs wurden in Kooperation mit Jenoptik fokussierbare Top-Emitter-LEDs bei 360 nm realisiert, die Ausgangsleistungen von 0,9 mW bei 10 mA und einen vollen Abstrahlwinkel von nur 5° zeigen. Gemeinsam mit der TU Berlin wurden das Design, die Epitaxie und die Chiptechnologie der UV-B-LEDs weiterentwickelt. Flip-Chip-montierte Bottom-Emitter-LEDs mit einer Emission bei 295 nm zeigen hervorragende Ausgangsleistungen von über 13 mW bei 410 mA und Betriebslebensdauern von über 1.000 Stunden. Die für UV-LEDs optimierten Epitaxieprozesse wurden zudem für die Entwicklung zukünftiger UV-C-Laserdioden genutzt. In optischen Pumpexperimenten zeigten Laserheterostrukturen mit AlGaIn-Quantenfilmen Laseremission im UV-C-Wellenlängenbereich 272–279 nm. Diese Quantenfilme wurden epitaktisch auf lateral überwachsenen AlN-Schichten auf Saphir oder auf AlN-Volumenkristallen abgeschieden.

# GaN OPTOELECTRONICS

The main objective of FBH's Business Area GaN Optoelectronics is to develop innovative light sources based on the semiconductor material gallium nitride (GaN) and its alloys AlGaN and InGaN. This material system opens up the possibility to fabricate highly efficient light emitters in a broad spectral region comprising the entire visible range and large parts of the ultraviolet (UV) spectrum. Research and development at FBH focus on laser diodes emitting in the 390–450 nm wavelength range, light emitting diodes (LEDs) for the UV-A, UV-B, and UV-C range as well as solar blind UV photodetectors. Laser diodes with tailored wavelengths find application in, for example, atom and molecule spectroscopy, whereas UV LEDs are interesting for applications in water disinfection, curing of coatings, and phototherapy.

Device development includes the modeling of optical and electrical properties of GaN-based layer heterostructures, growth by metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE), and chip fabrication in a cleanroom environment. These chips are then mounted onto heat sinks or into packages, and the devices are finally electro-optically characterized. FBH collaborates closely with the "Experimental Nanophysics and Photonics" group at TU Berlin. Within the framework of the innovative regional growth core "Berlin WideBaSe", the Business Area GaN Optoelectronics at FBH closely cooperates with numerous companies in Berlin such as Osram, Jenoptik, OSA Opto Light, and eagleyard Photonics.

In 2012, we were able to further improve device fabrication technologies as well as to enhance our understanding of the device physics and its functionality. We found that, due to strong anti-index guiding, the etch depth of the ridge is critical in order to obtain low lasing threshold in ridge waveguide laser diodes. The technologies to fabricate laser diodes with ridge widths below 2  $\mu\text{m}$  have been further stabilized. Thus, we now realize laser diodes operating CW in the wavelength range from 405–440 nm with output powers exceeding 20 mW.

In the field of UV LEDs, focusable top-emitter LEDs emitting at 360 nm have been developed in collaboration with Jenoptik. The devices show output powers of 0.9 mW at 10 mA and an emission cone with an opening angle of 5°. The design, epitaxy, and chip technology of UV-B LEDs were further developed jointly with the TU Berlin. Flip-chip mounted bottom-emitter LEDs emitting at 295 nm deliver excellent output powers of more than 13 mW at 410 mA and operation lifetimes exceeding 1,000 hours. Moreover, we started using our epitaxial processes optimized for UV LEDs for the development of future UV-C laser diodes. In optical pumping experiments, AlGaIn quantum well laser heterostructures deposited on epitaxially lateral overgrown AlN on sapphire and directly on AlN bulk crystals show lasing in the wavelength range 272–279 nm.

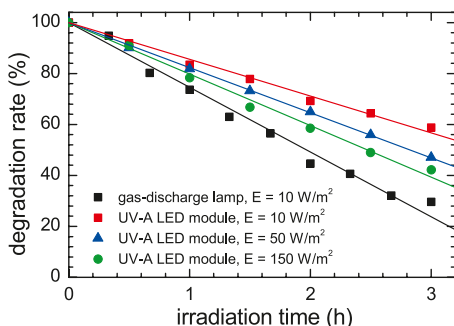
## CUSTOM UV LED MODULES FOR WATER PURIFICATION AND FLOW CYTOMETRY

Ultraviolet (UV) radiation can be used in various applications such as gas-sensing, curing of polymers, and medical treatment, just to name a few. Moreover, two different water treatment processes can be triggered by UV radiation. One is the well-established and widely used disinfection with UV-C radiation in the wavelength range 220–300 nm. This radiation damages or destroys the DNA and RNA of micro-organisms, whose duplication mechanism is thereby inhibited; the germ finally dies. The second possibility is the decomposition of organic compounds solved in water by UV-excited  $\text{TiO}_2$  photocatalysis. Titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) is a semiconductor material absorbing radiation with a wavelength shorter than approximately 400 nm. Owing to the exposure, photocatalytic active OH-radicals are generated at the surface of a  $\text{TiO}_2$  particle or layer enabling the destruction of nearby organic compounds. Due to the small photoactive efficiency of  $\text{TiO}_2$  the implementation of this principle is still under development. Currently, mercury-vapor gas-discharge lamps are used in all water treatment processes. Since several years, UV light emitting diodes (UV LEDs) have attracted interest as alternative UV radiation sources. Their advantages, compared to discharge lamps, are their versatility due to their features such as tailored wavelength, long lifetime, compact form factor, and low-voltage operation. The Ferdinand-Braun-Institut develops custom UV LED modules for specific applications in cooperation with the respective project partners. Long-term goal is to bring the UV LED technology into new applications and to develop technologies and systems which efficiently use the emitted UV radiation.

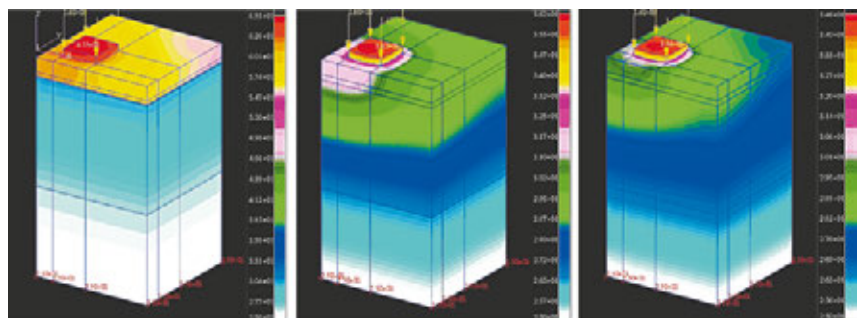
One example for the application-oriented activities at FBH in this field is the BMBF-funded joint research project "NanoPurification" with partners including Fraunhofer UMSICHT, Envirochemie GmbH, and others. Innovative water treatment reactors using novel UV LED modules as radiation source have been developed. They combine different water treatment techniques such as microfiltration, UV-C disinfection and  $\text{TiO}_2$  photocatalysis within a hybrid system. Fig. 1 shows a laboratory-type UV-A LED module emitting at 367 nm, used to determine the photoactivity of  $\text{TiO}_2$  layers activated by UV LED radiation. Experiments performed by Fraunhofer UMSICHT compare the methylene-blue degradation rate of  $\text{TiO}_2$  layers activated by the UV LED module and by a conventional discharge lamp, respectively. The results are shown in Fig. 2, depicting that it is possible in principle to activate the  $\text{TiO}_2$  layer and to degrade the methylene-blue with UV LED radiation. However, with LEDs a higher irradiance



▲ Fig. 1. Prototype of a custom UV-A LED module.



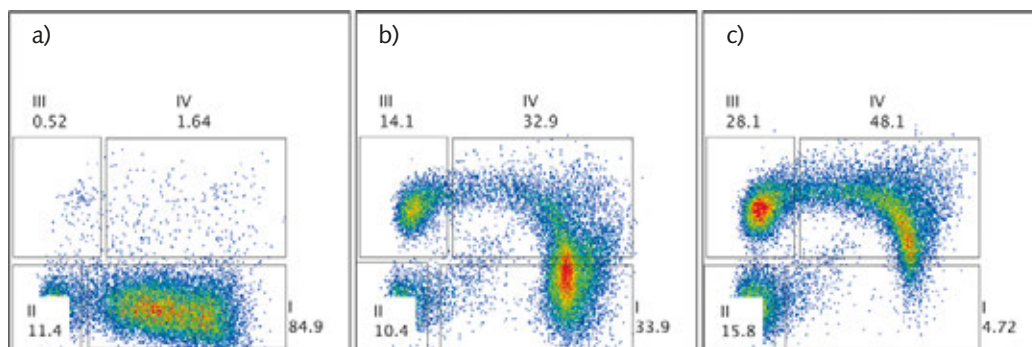
▲ Fig. 2. Degradation rate of methylene blue by UV LED and gas-discharge lamp activated  $\text{TiO}_2$  layers.



▲ Fig. 3. Thermal simulation of different thermal management configurations. Left: UV LED on IMS printed-circuit-board (PCB). Center: UV LED on SiC ceramics. Right: UV LED on AlN ceramics.

is needed to achieve the same degradation rate as with conventional gas-discharge lamps. Based on this circumstance, novel UV LED modules with a higher optical output power have been developed for different reactor types. Finite element method (FEM) thermal simulations of LED mounting schemes, as shown in Fig. 3, and optical simulations were used to optimize the module design. Only recently, field-tests with prototype UV LED reactors and different water types have been started to determine the performance of the hybrid water treatment systems.

In a further project, FBH in collaboration with Deutsches Rheuma-Forschungszentrum (DRFZ) and Technische Universität Berlin has developed a water disinfection module with UV-C LEDs emitting around 280 nm. The module has been implemented into a flow cytometric cell sorter that is used to count, identify, and sort cells. It allows reducing the number of micro-organisms in the carrier fluid by up to 3 orders of magnitude. Before introducing the UV module, costly and labor-intensive sterilization processes using bleach had to be performed every day. With the LED module, the cell sorter remains sterile for at least seven days after system sterilization with bleach. Furthermore, the researchers at DRFZ implemented a flow-cytometric method to count the amount of inactivated germs. Thus, they get a fast response on the disinfection potential when varying UV LED module parameters such as wavelength and irradiation dose. Fig. 4 shows experimental results of the impact of different irradiation doses, corresponding to liquid pressure and flow-rate. As can be seen, with increasing irradiation dose the majority of germ counts changes from "living population" (window I/II) to "inactivated population" (window III/IV). This method will also be used to determine and improve the disinfection potential of novel module designs. Right now we are working on an advanced module design that can be implemented more easily into existing and newly developed cell sorters.



## PATENT

M. Kneissl, T. Kaiser, T. Kolbe, "UV-C LED disinfection module for flow cytometry and sterile cell sorting by using a UV-C LED disinfection module", U.S. Patent Application 61/451,796.

◀ **Fig. 4.** Cell sorting results from flow-cytometric experiments. Living micro-organisms (boxes I/II) are marked by thizole orange and inactivated ones (boxes III/IV) with propidium iodide, referring to distribution along the horizontal or vertical axis, respectively. The numbers beneath the box numbers indicate the percentage from the total count. Experiments were performed at different irradiation doses, a) 0 J/cm², b) 0.31 J/cm², c) 0.65 J/cm² (©DRFZ).

## ZUSAMMENFASSUNG

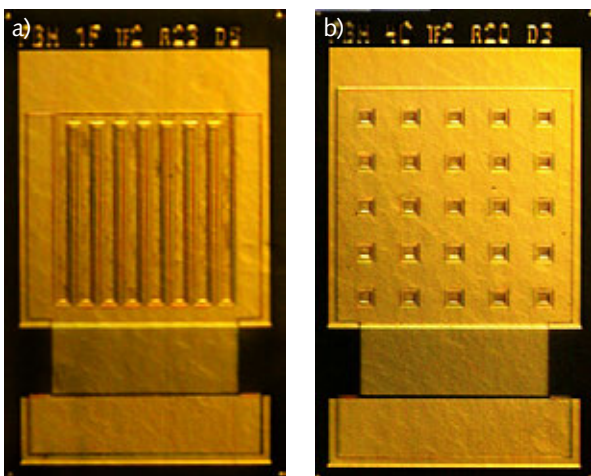
Ultraviolette (UV) Strahlung kann in zwei Verfahren zur Wasseraufbereitung eingesetzt werden: Zur Desinfektion mittels UV-C-Strahlung im Spektralbereich 220–300 nm sowie zum Abbau von in Wasser gelösten organischen Verbindungen mittels UV-angeregter Titan-dioxid-Photokatalyse. Der Einsatz neuartiger UV-Leuchtdioden (LEDs) als UV-Strahlungsquelle bietet dabei weitreichende Vorteile gegenüber herkömmlich eingesetzten Gasentladungslampen, wie etwa flexibel einstellbare Emissionswellenlängen, lange Lebensdauern oder die Versorgung mit Niederspannung. Um dieser Technologie neue Anwendungsgebiete zu erschließen, entwickelt das FBH mit Partnern maßgeschneiderte UV-LED-Module. So wurden im Forschungsprojekt „NanoPurification“ Module entwickelt und in neuartige Wasseraufbereitungsreaktoren integriert – deren Leistungsfähigkeit wird aktuell in Feldtests bestimmt. Weiterhin konnte in Kooperation mit dem Deutschen Rheuma-Forschungszentrum ein am FBH und an der TU Berlin entwickeltes UV-C-LED-Modul erfolgreich in ein Durchflusszytometer integriert werden. Es desinfiziert in diesem Messgerät zur Zellzählung und -bestimmung die Zell-Trägerflüssigkeit und sorgt somit mindestens sieben Tage lang für sterile Messbedingungen – zuvor musste das Gerät täglich aufwändig gereinigt werden.

## HIGH-POWER FLIP-CHIP UV-B LEDs EMITTING NEAR 300 NM

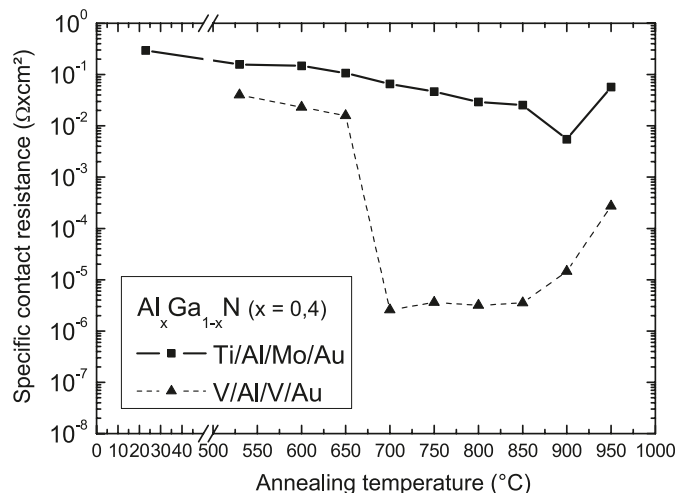
For applications in surface treatment of polymers, resist curing, hardening of paints, and phototherapy efficient light sources in the ultraviolet-B (UV-B) spectral region (280–320 nm) are needed. UV light emitting diodes (LEDs) are highly desirable since they can potentially provide compact, efficient, and environmentally friendly light with long operation lifetimes. On the other side, as an LED acts as a point light source emitting from a small area, thermal management is a key point to realize high output powers. Within the innovative regional growth core "Berlin WideBaSe", the FBH together with the TU Berlin and OSA OptoLight have developed flip-chip mounted LEDs emitting near 300 nm for applications in UV curing and phototherapy. A single LED provides an optical power over 10 mW with only little degradation for currents up to 400 mA.

Thanks to the work done over the two last years on improving the material quality, epitaxial layer structures are now available which allow output powers in the milliwatt range for emission wavelengths ranging from 295–305 nm. The layer structure currently used for our UV-B LEDs consists of an AlN buffer layer, AlN/AlGa<sub>N</sub> superlattices, a 4 μm thick n-type Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N buffer layer, an active region of three InAlGa<sub>N</sub> multiple-quantum wells, a p-type Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>N electron blocking layer (EBL), a p-type AlGa<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> superlattice, and a p-type GaN contact layer. In 2012, most of the research efforts targeted the implementation of technological concepts to improve the uniformity of light emission and heat dissipation and to ensure reliable functioning of AlGa<sub>N</sub>-based UV-B LEDs. Segmentation of the p-contact, like micro-LED arrays and multi-finger contacts concepts, has been developed to circumvent the current crowding problem as shown in Fig. 1. It was shown that the best LED performance was obtained with 20 μm wide contacts either in a micro-pixel or a multi-finger contact configuration.

One of the main advances resulted from the development of low resistivity contacts to n-AlGa<sub>N</sub> with high aluminum content. These contacts mainly consist of an alternating stack of thin layers of vanadium and aluminum which, after annealing at 725 °C, provide a specific contact resistance in the range of 10<sup>-4</sup> to 10<sup>-6</sup> Ohm.cm<sup>2</sup>. This is an improvement of 3 orders of magnitude with respect to the previous technology (Ti/Al), as shown in Fig. 2. Additional experiments have revealed correlations between electrical failures of the diodes, the topology of the surface (cracks of the epitaxial layer), and the thickness of the dielectric encapsulation



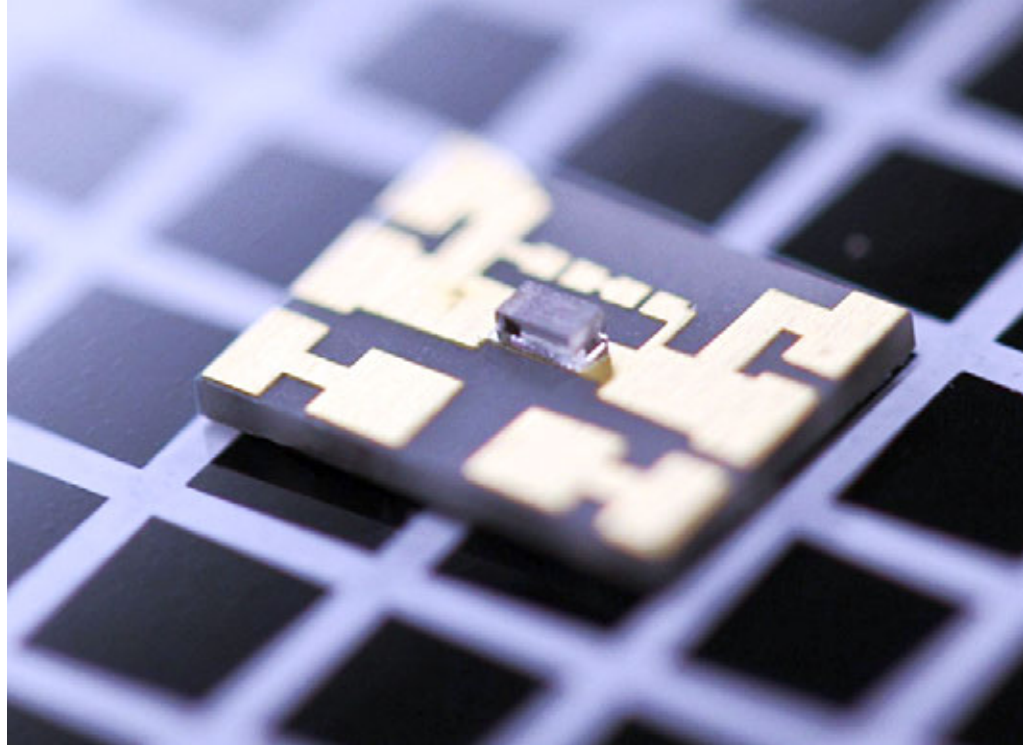
▲ **Fig. 1.** Optical microscope image of an interdigitated multi-finger UV-B LED chip a) and a micro-pixel UV-B LED chip b) after dicing.



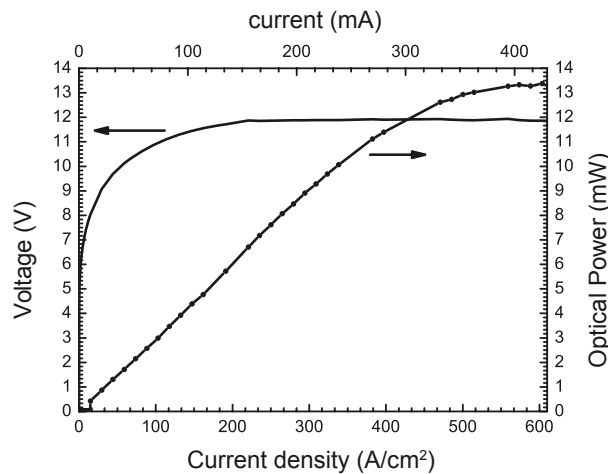
▲ **Fig. 2.** Evolution of the specific contact resistance with regard to the annealing temperature on n-Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>N with vanadium metallization (dashed line) and titanium metallization (solid line).

layer ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  or  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Furthermore, the optimization of the laser scribing process allowed the precise and defect-free dicing of LED Chips from  $430\ \mu\text{m}$  sapphire substrates. Chips were soldered onto AlN ceramic submounts on a regular basis, enabling investigations of lifetime and degradation. Preliminary tests show that the UV LEDs are still functional after more than 1,000 h continuous-wave operation at room temperature. Degradation occurs mainly during the 100 first hours with a power loss of around 10 % with no significant degradation observed afterwards. Further investigations of the lifetime limiting mechanism are in progress.

Combining all these technological advances allowed us to realize flip-chip mounted UV-B LEDs, as shown in Fig. 3, which is essential for efficient thermal management and enhanced light extraction. As can be seen in Fig. 4, the LED can be operated up to DC currents of 420 mA before the thermal rollover limits the output power. It should be noted that commercially available LEDs are specified so far for operation at a low DC currents of 20 mA or less. In contrast, the output power of our flip-chip UV-B LEDs increases linearly with the drive current up to 270 mA, demonstrating the excellent thermal management for this configuration and robustness of the device.



▲ Fig. 3. UV-B LED flip-chip mounted on a ceramic package.



◀ Fig. 4. Current voltage characteristic of a flip-chip UV-B LED soldered on an AlN ceramic package.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Leuchtdioden (LED), die im ultravioletten (UV) Spektralbereich von 280–320 nm und damit im UV-B-Bereich emittieren, sind für Anwendungen wie das Aushärten von Lacken und Farben sowie für die medizinische Phototherapie interessant. Sie können dort konventionelle Gasentladungslampen ersetzen, deren lange Aufwärmzeit, hohe Bruchempfindlichkeit und Quecksilbergehalt unerwünscht sind. Zusammen mit der TU Berlin ist es dem FBH 2012 gelungen, LEDs mit einer Emissionswellenlänge von 295 nm zu entwickeln, die Ausgangsleistungen von über 10 mW liefern. Diese Spitzenwerte beruhen auf einer optimierten Epitaxiestructur, einer ausgereiften Chiptechnologie – u.a. mit niederohmigen Kontakten auf n-AlGaN-Schichten mit einem Aluminiumgehalt von 40 % –, einer präzisen Vereinzelung der Saphirwafer in Chips und einer Flip-Chip-Lötung auf AlN-Submounts. Montierte Einzelchips können bei Strömen von über 400 mA betrieben werden und zeigen Betriebslebensdauern von mehr als 1.000 Stunden.

#### PUBLICATIONS

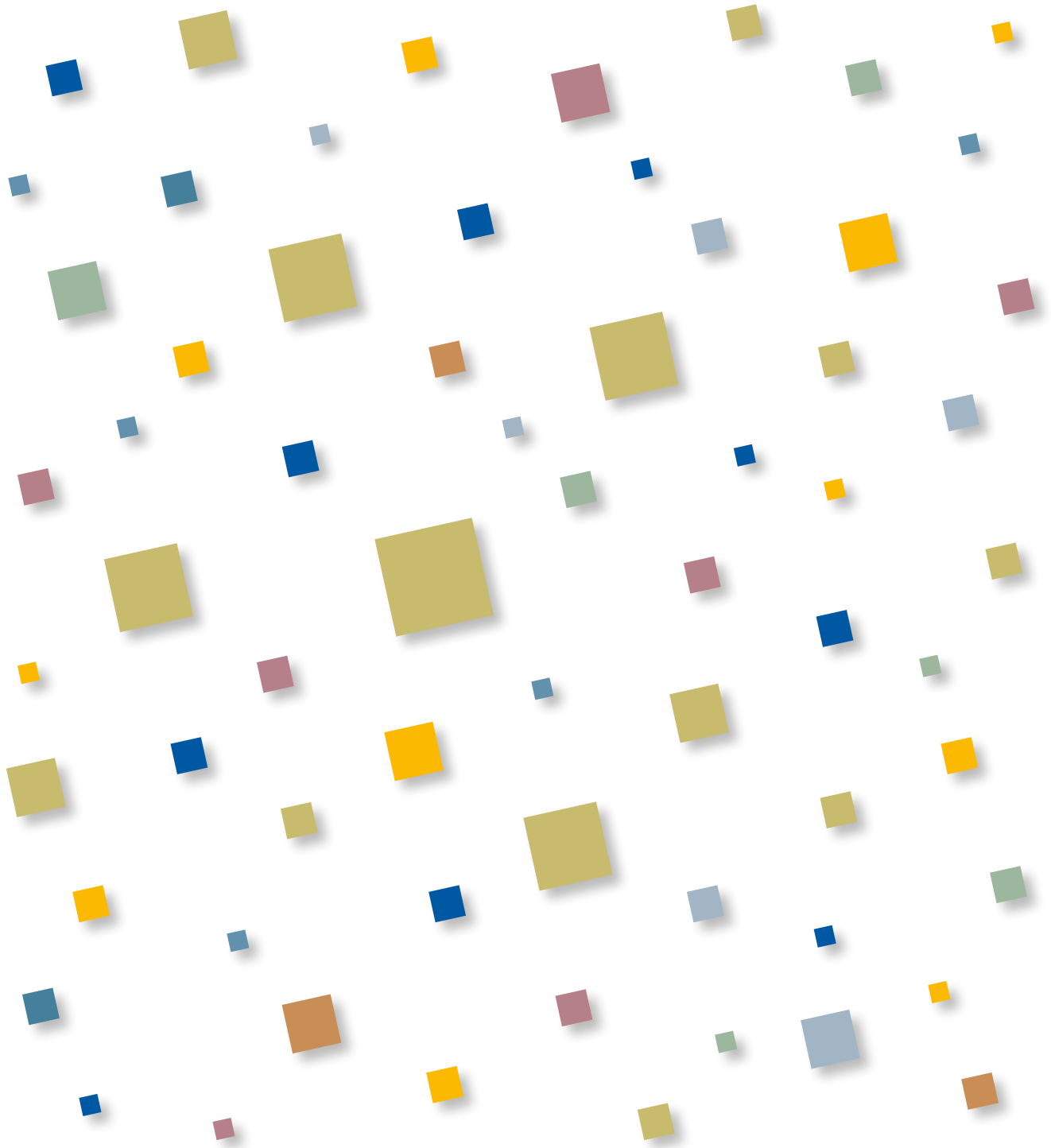
N. Lobo Ploch, H. Rodriguez, C. Stölmacker, M. Hoppe, M. Lapeyrade, J. Stellmach, F. Mehnke, T. Wernicke, A. Knauer, V. Kueller, M. Weyers, S. Einfeldt, M. Kneissl, "Effective Thermal Management in Ultraviolet Light Emitting Diodes with Micro-LED Arrays", IEEE Transactions on Electron Devices 60, 782 (2013).

V. Kueller, A. Knauer, C. Reich, A. Mogilatenko, M. Weyers, J. Stellmach, T. Wernicke, M. Kneissl, Z. Yang, C. L. Chua, N. M. Johnson, "Modulated Epitaxial Lateral Overgrowth of AlN for Efficient UV LEDs", IEEE Photonics Tech. Letters, Vol. 24, 1603 (2012).





# MATERIALS & PROCESSES MATERIALIEN & PROZESSE



## 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 Leistungsbaulementen für Mikrowellen- und Leistungsschalt-Anwendungen, UV-LEDs, Laserdioden und UV-Photodetektoren zum Einsatz kommen. Ein Beispiel für die Materialforschung sind Schichtstrukturen für GaN-basierte Hochvolt-Leistungstransistoren, die auf der Entwicklung entsprechender Epitaxieprozesse basieren. 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, Photodetektoren) getrennt bearbeitet werden. Auch an defektarmen AlN- und AlGaN-Schichten als Grundlage für ultraviolette (UV) Leuchtdioden wird geforscht. Sie 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 AlGaN-Schichten als Templates für UV-LEDs abzuscheiden.

Im Bereich der Prozesstechnologie steht neben der etablierten Technologie für GaAs-Laserdioden die weitere Optimierung und Entwicklung von robusten Prozessmodulen für die Fertigung von GaN-basierten Hochleistungstransistoren im Fokus. 2012 war die Verfahrensentwicklung eines Gatemoduls für Anwendungen bei 33–50 GHz ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten. Angestrebt sind dabei vor allem eine hohe Reproduzierbarkeit, Ausbeute und Zuverlässigkeit. Bei UV-LEDs und Lasern auf GaN-Basis wurde weiter intensiv an der Verbesserung von Ohm'schen Kontakten zu p-GaN und n-AlGaN gearbeitet. Um diese Bauelemente präzise zu vereinzeln, wurde das lasergestützte Ritz- und Spaltverfahren optimiert.

Gemeinsam mit Forschungspartnern werden zahlreiche Projekte bearbeitet: So wurde im vergangenen Jahr die Entwicklung der (Al)GaN-basierten UV-Photodetektoren fortgeführt. Ziel ist die Weiterentwicklung der Bauelemente sowie ihr Einsatz als Werkzeug zur Materialcharakterisierung. Auch die F&E-Kooperation mit dem Berliner Unternehmen sglux zur Herstellung von robusten UV-Photodetektoren auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) wurde erfolgreich fortgesetzt. Die Ergebnisse führten beim Industriepartner zu einem deutlichen wirtschaftlichen Wachstum. Weiterhin wurden GaAs/AlGaAs-Quantenkaskadenlaser erfolgreich auf Heterostrukturen vom Paul-Drude-Institut prozessiert, die für spektroskopische Anwendungen im Terahertz (THz)-Bereich eingesetzt werden sollen. Durch optimierte Montage der Laser konnte die Wärmeableitung um 30 % verbessert und die Betriebstemperatur um 10 K erhöht werden.

Die Arbeiten zur Realisierung von InP-basierten Heterobipolartransistoren (HBTs) in Transfer-Substrat-Technologie wurden erfolgreich fortgesetzt. Sie zielen beispielsweise auf Anwendungen für bildgebende Verfahren bei 70–300 GHz. Die Ergebnisse bilden die Grundlage, um Modelle für die Entwicklung von Oszillatoren und Leistungsverstärkern zu überprüfen und weiter zu entwickeln. Gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Innovative Mikroelektronik (IHP) wurde vom FBH ein im Leibniz-Wettbewerb eingeworbenes Projekt zur dreidimensionalen Heterointegration von InP-HBTs in einen Silizium-CMOS-Prozess erfolgreich bearbeitet. Durch die erfolgreiche Kombination der beiden komplementären Technologien entstanden vollkommen neuartige hybride Chips, die höhere Leistungen im THz-Bereich ermöglichen. Die Entwicklungsarbeiten zu Planarisierungs-, Verbindungs- und Via-Technologien führten zu einem präzise ausgerichteten Waferverbund mit höchstfrequenztauglichen Verbindungen zwischen den CMOS- und InP-HBT-„Welten“.

Technologieentwicklung und Materialforschung, wie etwa die Lieferung von Epitaxiewafern, die Analyse von Schicht- und Bauelementstrukturen sowie diverse Waferprozesse, bietet das FBH auch als Dienstleistungen für Kunden aus Forschung und Industrie an.

## MATERIALS & PROCESSES

Activities in the development of materials and technology are focused on exploring materials and process modules paving the way for fabrication of advanced devices. The Materials Technology and Process Technology Departments provide the technological preconditions for the development of devices that are realized in the respective research areas. Materials on the basis of 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 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 multiwafer reactors (AIX 2600 G3 HT) and a smaller single wafer machine for explorative work. This allows separating the work on bipolar devices with p-doped layers (LEDs, laser diodes) from that on unipolar devices (GaN-HFETs and UV photodetectors). Also, AlN and AlGaIn layers with reduced defect density for UV LEDs are being developed. They 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.

In device processing, the focus is on the optimization and development of robust and reliable process modules to fabricate GaN-based high-power transistors. In 2012, the development of a gate module for applications at 33–50 GHz was started. Main goals to achieve are high reproducibility, yield, and reliability. Regarding UV LEDs and GaN laser diodes, we continued our research on improving reliable ohmic contacts to p-GaN as well as to n-AlGaIn. Additionally, a laser-based scribing and breaking process was optimized to precisely separate the LED and GaN laser diode chips.

In cooperation with research partners, we successfully advance joint projects. The development of (Al)GaIn photodetectors, for instance, both as device and tool for the characterization of epitaxial layers has been further promoted. Also, the R&D cooperation with sglux on the fabrication of UV photodetectors based on silicon carbide (SiC) progressed particularly well. The results led to significant economic growth of our industrial partner. Moreover, we successfully fabricated GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers on heterostructures grown at Paul-Drude-Institute. These lasers target at applications in THz spectroscopy. Due to optimized mounting, the thermal conductance of the assembly could be improved by 30 %, and the working temperature could be increased by 10 K.

Fabrication of InP-based hetero bipolar transistors (HBTs) using transferred substrate technology has been continued in 2012. The devices address, for example, imaging applications at 70–300 GHz. The results allow us to evaluate and improve models for the development of oscillators and power amplifiers. In collaboration with the Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP), a high-risk Leibniz project on three-dimensional hetero-integration of InP-HBTs into a silicon-CMOS process was completed with excellent results. By successfully combining the complementary technologies, entirely novel hybrid chips have been created, offering the potential for higher powers in the THz range. The transferred substrate technology developed at FBH was adapted to obtain the wafer-to-wafer alignment accuracy necessary for such an integration scheme. Research on planarization, assembling, and via technologies yielded sandwich-like wafer bonds with RF connections aligning the, up to now, separate CMOS and InP-HBT “worlds”.

Besides basic developments in epitaxy and process technology, external services such as delivery of epitaxial wafers, 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.

# HIGH RESPONSIVITY UV-C ALGaN PHOTODETECTORS ON PATTERNED SAPPHIRE SUBSTRATES

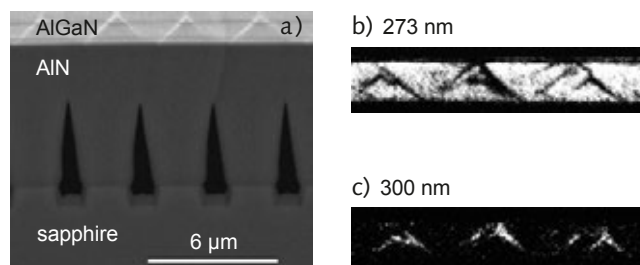
Photodetectors enable easy, accurate, and long-term stable control of high-power UV lamps. Such lamps are widely used in UV lithography, medical applications, and disinfection. For the purification of water, for example, emission in the wavelength range between 240 nm and 290 nm is effective. It is therefore essential to control the power emitted in this range. Tailoring of the responsivity spectrum can be achieved by adjusting the composition of AlGaN absorber layers. Due to their big lattice mismatch to the sapphire substrate, the dislocation density (DD) is relatively high. As a consequence, the carrier lifetime is quite short, limiting the external quantum efficiency (EQE). Epitaxial lateral overgrowth (ELO) of patterned AlN/sapphire templates as a means to reduce the DD has been successfully developed to increase the efficiency of UV LEDs. We have thus adopted this effective approach for UV-C photodetectors (PD) to increase EQE.

AlN/sapphire templates with etched stripes were first overgrown by MOVPE with a several micrometer thick AlN layer until complete coalescence of the surface was achieved. On these ELO templates an about 1.5  $\mu\text{m}$  thick  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$  layer is grown acting as the absorber layer of the photodetector. Fig. 1 shows an electron microscopy image of the full layer stack and monochromatic cathodoluminescence images of the absorber layer. Due to faceted growth over bunched steps on the ELO templates there are compositional modulations with higher GaN fraction along the triangle edges.

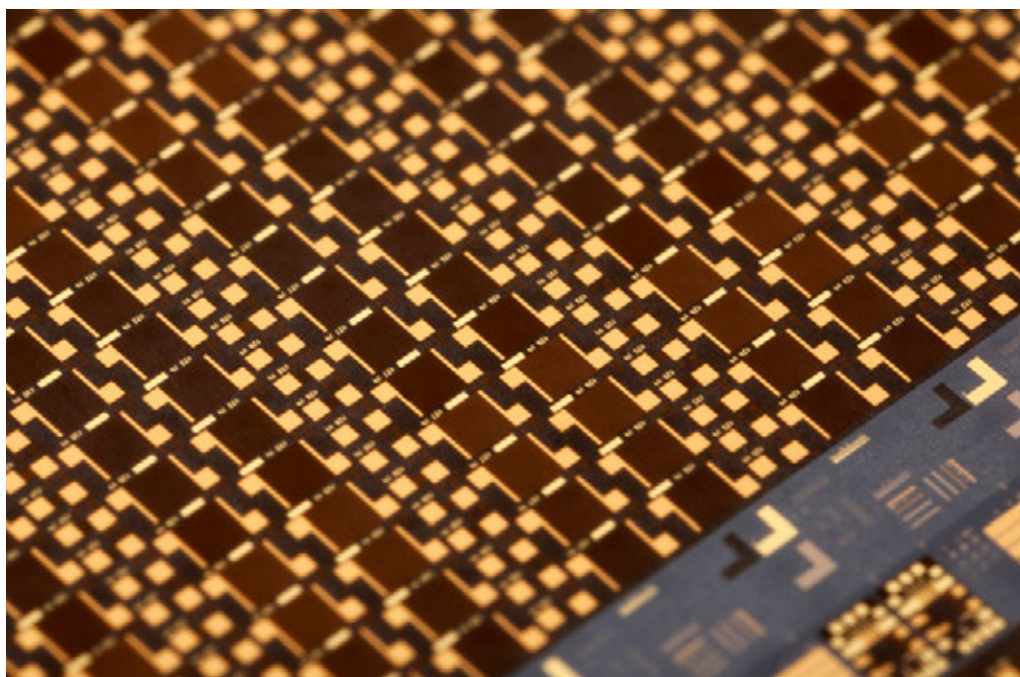
To form MSM (metal-semiconductor-metal) detectors Pt/Ti/Au-Schottky contacts were evaporated on the absorber layers. The interdigitated devices with  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  detector area have  $400 \mu\text{m}$  finger length,  $2 \mu\text{m}$  finger width and different finger spacings  $d_f$  (Fig. 2). Devices of type ELO || PDs have contact fingers parallel to the etched stripes of the ELO templates, devices of type ELO  $\perp$  PDs have the fingers perpendicular to the stripes.

Current/voltage characteristics under illumination at  $\lambda = 275 \text{ nm}$  and an optical power  $P_{\text{opt}} = 35 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  show big differences for the various types of PDs (Fig. 3): For detectors on planar templates the dark current remains in the low pA range, and the photocurrent exceeds the dark current by a factor of 1000. ELO || PDs with the carrier flow perpendicular to the stripes behave similarly. However, ELO  $\perp$  PDs with the carriers flowing parallel to the stripes show much higher photocurrent: For bias  $U_b > 3 \text{ V}$  the photocurrent drastically increases due to internal gain. Using detector designs with finger spacings  $d_f = 15 \mu\text{m}$  the dark current stays in the 200 pA range.

► **Fig. 2.** Detail of a sapphire wafer with AlGaN MSM photodetectors in different interdigital designs and several test structures.



▲ **Fig. 1.** AlGaN absorber layer on ELO template: cross-section backscattered electron microscopy image b) and monochromatic cathodoluminescence images c), d) from cleaved edge at 100 K.



A. Knigge, M. Brendel, F. Brunner, S. Einfeldt, A. Knauer, V. Kueller, M. Weyers, „AlGaIn photodetectors for the UV-C spectral region on planar and epitaxial laterally overgrown AlN/sapphire templates“, Phys. Status Solidi C 10, no. 3, 294–297 (2013).

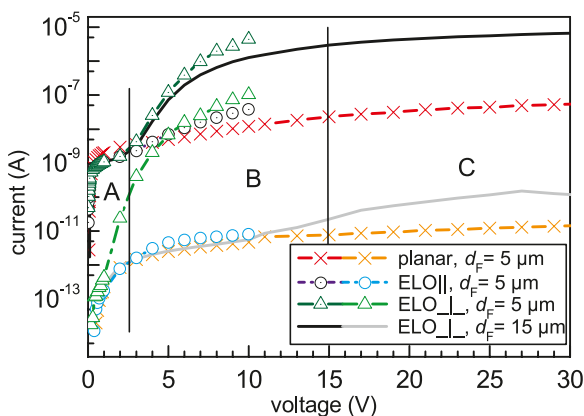
A. Knigge, M. Brendel, F. Brunner, S. Einfeldt, A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, M. Weyers, “AlGaIn MSM Photodetectors on Planar and Epitaxial Laterally Overgrown AlN/Sapphire Templates for the UV-C Spectral Region”, J. Appl. Phys. 52, no. 08JF03 (2013).

The responsivity spectra of ELO  $\perp$  PDs (Fig. 4) are quite similar to those of PDs on planar template. One exception is the region near the bandgap where two cut-off wavelengths are found well matching the ones found in cathodoluminescence. The responsivity of ELO  $\perp$  PDs strongly increases with rising bias over the whole wavelength range. An external quantum efficiency EQE = 1 is reached for  $U_B \approx 6$  V. At 30 V, the EQE is about 77, which clearly indicates the presence of gain mechanisms.

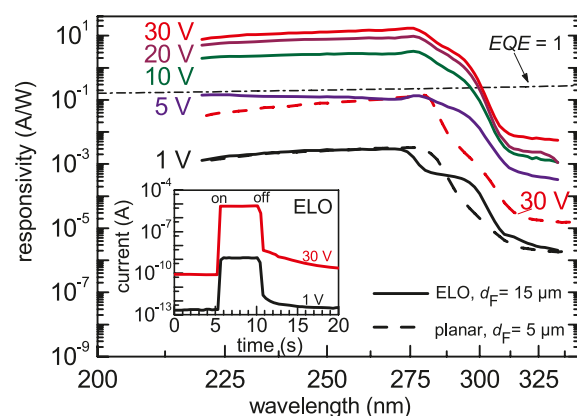
Photoconductive gain is often connected with slow switching times, so called persistent photoconductivity (PPC). Testing the switching behavior of ELO  $\perp$  PDs shows that the current decreases by a factor  $10^3$  within 300 ms (inset in Fig. 4). The remaining current drops within a few seconds and should not limit the applicability of such MSM PDs. Very interesting is the linearity of the ELO  $\perp$  PDs. There are three operation regimes (marked in Fig. 3): for  $U_B < 5$  V (range A) the photocurrent linearly increases with the optical power, for  $2.5$  V  $< U_B < 15$  V (range B)—where gain mechanisms are starting—the current sublinearly increases. In the saturation regime for  $U_B > 15$  V (range C) the photocurrent is again linear.

In conclusion, the UV-C MSM photodetectors on ELO templates with the proper contact finger orientation and spacing are very promising for applications where high responsivity, a linear response, and dark currents in the pA range are required.

The AlGaIn photodetector activities are funded by the BMBF within the Berlin WideBaSe initiative (03WKBT02C).



▲ Fig. 3. Photo- (dark lines) and dark current (light lines) / voltage characteristics of AlGaIn MSM PDs on ELO and planar AlN templates with different finger spacings  $d_F$  and orientation for  $P_{opt} = 5.5$  W/m<sup>2</sup> and  $\lambda = 270$  nm.



▲ Fig. 4. Responsivity spectra of AlGaIn MSM PDs with  $d_F = 15$   $\mu$ m on ELO  $\perp$  templates (full lines) and planar templates (dashed lines) in dependence on the bias voltage. Inset: Switching transient for  $P_{opt} = 5.5$  W/m<sup>2</sup> and  $\lambda = 270$  nm.

ZUSAMMENFASSUNG

Photodetektoren sind wichtige Komponenten zur Kontrolle von UV-Strahlung. Sie kommen bei UV-Lampen, -Leuchtdioden und -Lasern in Bereichen wie der Lithographie, Drucktechnik, Medizin und zur Desinfektion zum Einsatz. Für die Wasserdesinfektion beispielsweise ist nur der Wellenlängenbereich von 240–290 nm nutzbar, daran angepasste Photodetektoren (PD) sind dazu unerlässlich. Entsprechende, am FBH entwickelte AlGaIn-PDs erreichen auf üblichen planaren Saphir-Substraten eine externe Quantenausbeute (EQE) von 60 % ( $U_B = 30$  V). Die Empfindlichkeit der UV-PDs konnte durch Übertragen der für LEDs entwickelten Technologie des epitaktischen lateralen Überwachens (ELO) wesentlich erhöht werden. PDs auf ELO-Substrat mit einer Fingerorientierung senkrecht zu den geätzten Streifen des ELO-Substrates weisen dabei deutlich höhere Empfindlichkeitswerte auf als solche auf planarem Substrat. Da interne Verstärkung auftritt, erhöht sich die Quanteneffizienz bis 77 ( $U_B = 30$  V), wobei der Photostrom weiterhin linear mit der Lichtintensität ansteigt.

# HYDRIDE VAPOR PHASE EPITAXY OF THICK $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ LAYERS

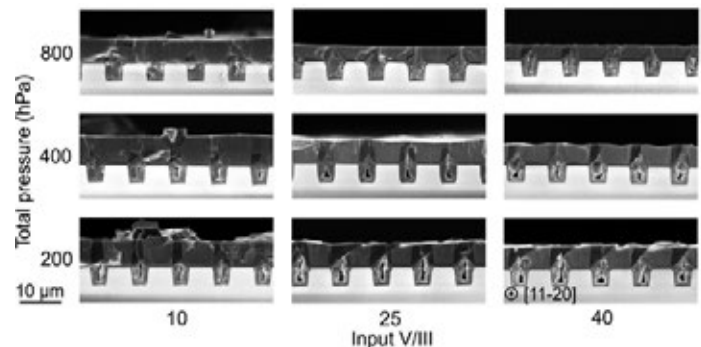
Devices emitting in the UV range are needed, e.g. for materials processing, treatment of skin diseases, and stimulation of plants to produce vaccines. However, the performance of group III-nitride based UV emitters is still limited by material quality. This leads to losses when converting electrical energy into light output power. Today, the external quantum efficiency (EQE) of UV LEDs drops down from above 50 % at 400 nm (UV-A) to less than 0.1 % near 210 nm (UV-C). The main reasons for this are material imperfections, especially a high threading dislocation density (TDD) in the device layer structures due to lattice mismatch. In recent years, devices operating either in the near UV-A or in the far UV-C have taken benefit from reduced TDD due to homo-epitaxial or pseudomorphic growth on bulk GaN or AlN substrates. However, for UV-B devices emitting in the range of 290 nm to 340 nm the lattice mismatch to both binary substrates exceeds 1% resulting in poor device efficiency. The use of bulk-like  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers in the medium composition range with reduced TDD opens up a promising approach to improve LED performance. Hydride vapor phase epitaxy (HVPE) with its relatively high attainable growth rates is expected to be the method of choice to grow bulk-like  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers of any composition. However, the task to fabricate such  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers is challenging, and worldwide only a few research groups are active in this field so far.

In our HVPE reactor,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers can be grown in the entire composition range. To overcome the limitations in layer thicknesses that can be grown free of cracks we exchanged planar sapphire for patterned sapphire substrates (PSS). PSS were prepared by photolithography and inductively coupled plasma etching with depths of up to 4.5  $\mu\text{m}$ . An about 500 nm thin AlN seed layer has proven to be advantageous for composition homogeneity and morphology of the subsequently grown  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers.

PSS with stripes oriented along the [11.0] axis of sapphire were successfully used to grow coalesced c-plane oriented  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers in the medium composition range. So far, favored growth conditions comprise a total pressure of 800 hPa, a growth temperature of 1080  $^\circ\text{C}$ , a V/III ratio of 42, a growth rate of about 20  $\mu\text{m}/\text{h}$ , and the use of PSS with 0.25 $^\circ$  off towards  $(\bar{1}100)$ . A number of secondary electron microscopy (SEM) cross-sectional micrographs of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers in Fig. 1 grown at different total pressures and different V/III ratios illustrate these findings. No significant change of the layer morphology was observed up to a thickness of 40  $\mu\text{m}$ .

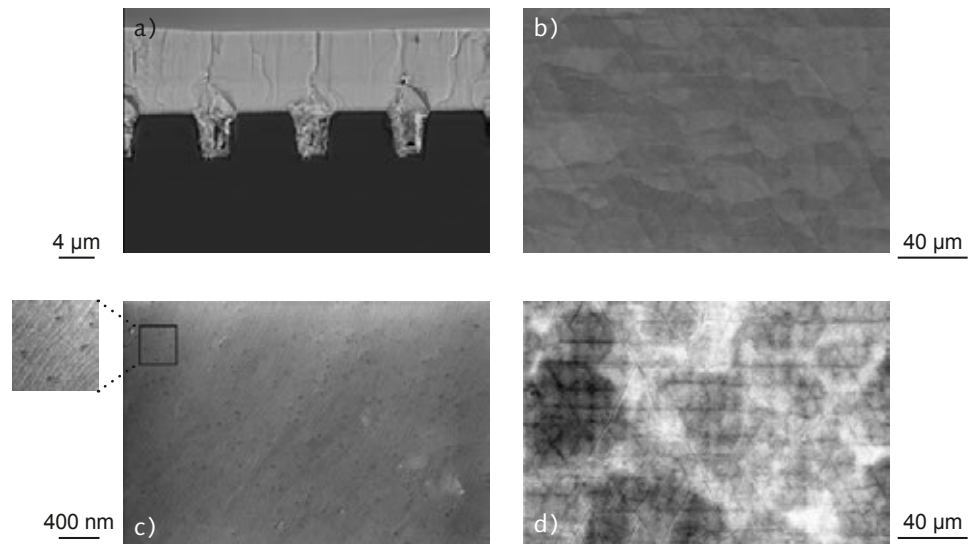
Full width half maxima of x-ray diffraction rocking curves of an 8  $\mu\text{m}$  thick  $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{N}$  layer grown in this way were below 1700 arcsec for 002 and 302 reflections. Fig. 2 contains cross-sectional and plan-view SEM micrographs of this layer. The number of spots in Fig. 2c of  $3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  is assumed to represent the lower limit of threading dislocation density. However, plan-view images recorded by cathodoluminescence (CL) in Fig. 2d revealed that there are still overgrown cracks in the layer. Vertical lines represent the stripe pattern of the PSS whereas horizontal lines and lines with 60 $^\circ$  to the horizontal are due to buried cracks. This indicates the need for further optimization of the PSS pattern to achieve the targeted improvement of structural quality with regard to thickness.

Surprisingly, growth on PSS with stripes oriented perpendicularly to the [11.0] axis of sapphire was found to result in coalesced a-plane oriented  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers. So far, these experiments were performed only for layers with an Al content of  $x \sim 0.9$ . Nevertheless, these experiments open the door to the interesting field of non-polar UV devices with new optoelectronic prop-

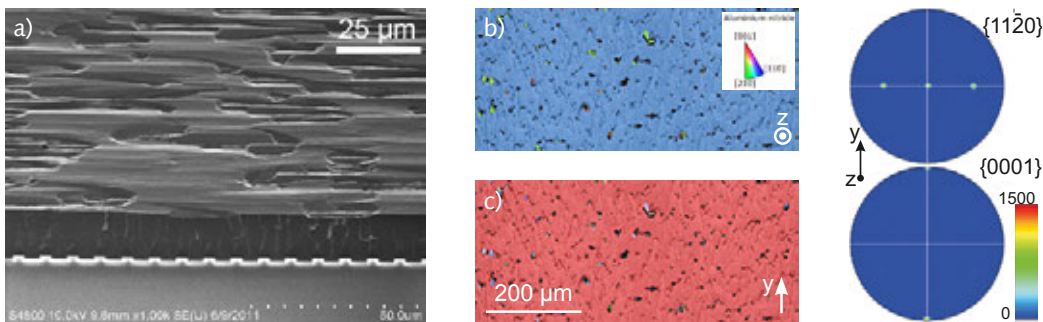


▲ **Fig. 1.** Cross-sectional SEM micrographs of  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  layers grown on patterned sapphire substrates with different total pressure and V/III ratio.

erties. The a-plane formation can be explained by simultaneous growth of c-plane oriented seeds on the c-plane oriented horizontal areas and on the a-plane oriented vertical sidewalls of the trenches. Under appropriate deposition conditions, the seed growth from the sidewalls can prevail, resulting in coalesced layers with a predominant a-plane surface. Electron backscatter diffraction (EBSD) measurements (courtesy of Bruker Nano GmbH) at a 0.8 mm x 0.6 mm surface area of a 15  $\mu\text{m}$  thick layer revealed an a-plane oriented fraction of 94 % (Fig. 3). Layers with thicknesses up to 60  $\mu\text{m}$  without cracking during growth have already been demonstrated.



▲ **Fig. 2.** SEM and CL micrographs of an 8  $\mu\text{m}$  thick  $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{N}$  layer on PSS. Cross-section SEM a), plan-view SEM of different magnification b), c), and plan-view CL d).



◀ **Fig. 3.** SEM image of an a-plane 15  $\mu\text{m}$  thick  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$  layer a), EBSD maps along the growth axis b) in-plane c) resulting pole figures revealing the a-plane orientation.

Significant progress has been achieved in the growth of thick  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers on PSS. Further process optimization puts the fabrication of bulk-like c-planar oriented  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  layers for promising use as quasi-substrate for UVB LEDs within reach. The newly found mechanism of the orientation change from a c-plane PSS to an a-plane  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$  surface may form an additional future field of research.

This work was supported by the German Research Foundation (DFG) in the project RI1224/1-1.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Leistungsfähigkeit von UV-LEDs ist zurzeit noch durch Defekte im Material begrenzt. Dadurch sinkt die Effizienz von LEDs mit abnehmender Emissionswellenlänge von 50 % bei 400 nm auf weniger als 0,1 % bei 210 nm. Dicke  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  Schichten als Quasisubstrate könnten die Defektdichte reduzieren und ermöglichen damit effizientere UV-B-LEDs (290 bis 340 nm), etwa zur Materialhärtung oder Erzeugung pflanzlicher Impfstoffe. Im gesamten Kompositionsbereich wurde  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  mittels Hydridgasphasenepitaxie (HVPE) hergestellt. Im Vergleich zu planaren Saphirsubstraten reduzieren strukturierte Saphirsubstrate (PSS) Verspannungen und Risse und erlauben somit das Wachstum größerer Schichtdicken. PSS mit Streifen in [11.0]-Richtung führten bei einer Rate von 20  $\mu\text{m}/\text{h}$  zu  $\text{Al}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{N}$ -Schichten mit ebener Morphologie. Durch Kathodolumineszenz werden vergrabene Risse und damit verbleibender Optimierungsbedarf sichtbar. Wachstum auf dazu senkrechten Streifen haben zu a-planar orientierten  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$ -Schichten geführt, die für die Entwicklung noch kurzweiliger LEDs interessant sind.

#### PUBLICATIONS

S. Hagedorn, E. Richter, U. Zeimer, M. Weyers, "HVPE growth of thick  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$  layers on trench patterned sapphire substrates", *Phys. Stat. Sol. C*, vol. 10, no. 3, 355–358 (2013).

S. Hagedorn, E. Richter, U. Zeimer, D. Prasai, W. John, M. Weyers, "HVPE of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers on planar and trench patterned sapphire", *J. Cryst. Growth*, vol. 353, no. 1, 129–133 (2012).

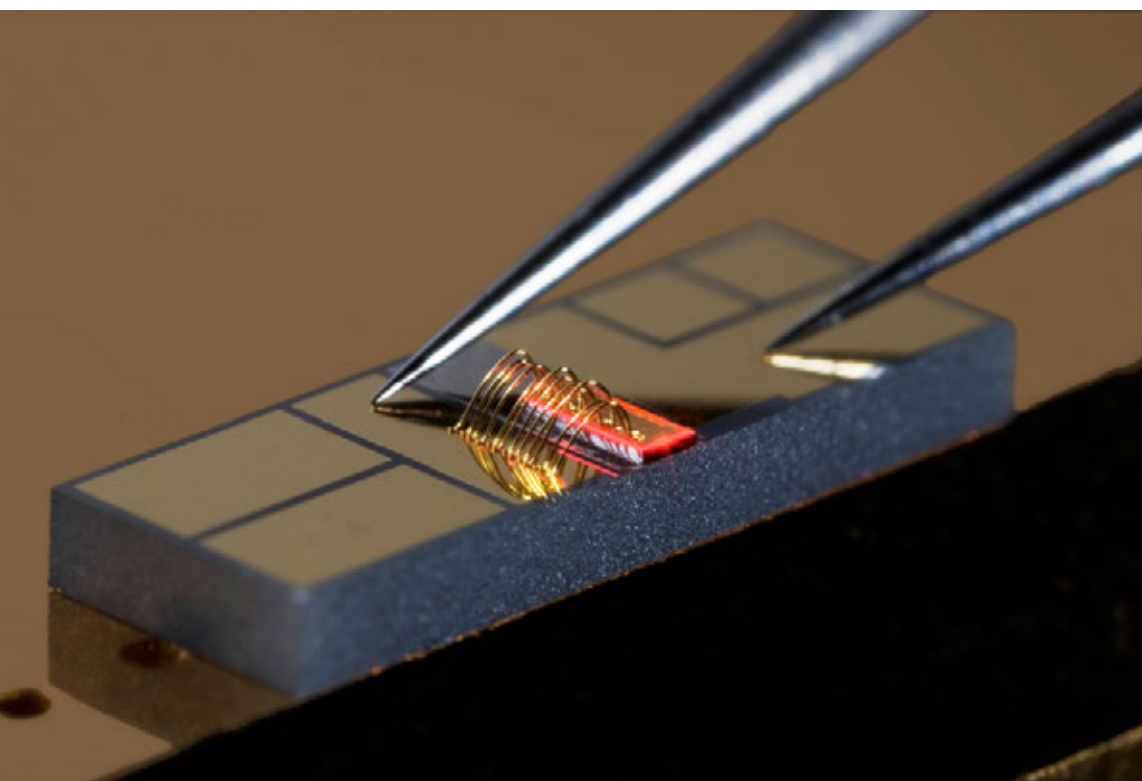
## EPITAXIAL OPTIMIZATION OF ALGAINP LASER DIODES AT 633 NM

For display applications, wavelengths both matched to the sensitivity of the human eye and offering good color rendering are mandatory. Therefore, concerning the red spectral region, laser sources emitting in the wavelength range around 630 to 635 nm with good beam quality and high output power in the range of 1–5 W are highly demanded. In this regard, AlGaInP-based laser diodes (LD) are particularly well-suited as they are compact and efficient. Devices for longer wavelengths around 650 nm already feature excellent performance. FBH is currently working to increase the efficiency and output power at 635 nm. Mastering this wavelength range also paves the way to replace the widely used HeNe lasers by LDs at 633 nm (see p. 82).

For the epitaxial growth of heterostructures suited to meet these requirements the choice of the p-cladding material as well as the proper dopant are key issues. AlGaAs as p-cladding layer (p-CL) offers excellent control in growth and can be easily doped to high levels by using carbon. Additionally, process technology is well established and ridge-waveguide (RW) lasers with integrated distributed Bragg reflector surface gratings can be realized. This makes this type of heterostructure well-suited for such complex device structures. However, it does not meet the state-of-the-art with respect to output power and efficiency of more simple stripe lasers aiming at high output power. Here, AlInP as p-CL offers a larger band-gap, potentially improving carrier confinement and reducing leakage currents compared to Al<sub>0.85</sub>Ga<sub>0.15</sub>As.

Potential dopants to influence the material properties as desired are zinc (Zn) and magnesium (Mg). We use Zn, a common p-dopant, as dopant for the AlGaInP waveguide in combination with C-doped AlGaAs. While it is possible to apply Zn also as dopant for AlInP-based heterostructures, it can diffuse and has a higher solubility in AlGaInP than in AlInP. This leads to an unwanted higher doping level in the waveguide than in the cladding (Fig. 2b). Mg, on the other hand, suffers from segregation and memory effects, which makes it difficult to control the dopant profile. However, it shows a reduced tendency for diffusion and is reported to feature a higher electrical activation as acceptor, therefore leading to a lower series resistance at the same atomic concentration level as Zn.

Fig. 2 shows the doping profiles of three laser structures with differently doped p-cladding layers taken by secondary ion mass spectroscopy (SIMS). From Fig. 2a can be seen that Zn



◀ **Fig. 1.** Red-emitting diode laser on sub-mount.



J. Pohl, M. Zorn, F. Bugge, G. Blume, D. Feise, A. Knigge, S. Knigge, K. Paschke, H. Wenzel, M. Weyers, "Epitaxie-optimierung von 633 nm AlGaInP Laserdioden", 27. DGKK-Workshop "Epitaxie von III/V-Halbleitern", Erlangen, December, 6–7 (2012).

nically stays in the AlGaInP layer at the desired level of  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  when the p-CL is C-doped AlGaAs. When using a Zn-doped AlInP p-CL, Zn accumulates in the AlGaInP waveguide, and its incorporation is limited to below  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (Fig. 2b). This unwanted doping profile results in additional absorption losses in the too highly doped waveguide and additional series resistance in the too lowly doped p-CL. After process optimization aimed at mastering the doping delay of Mg due to segregation, the desired increase in doping level towards the p-CL up to above  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  is obtained.

The two different epitaxial structures mentioned above were processed into broad area lasers. The performance of an LD with Mg-doped AlInP p-CL and one with AlGaAs p-CL is compared in Fig. 3. The power-current characteristic measurements were taken in the pulsed regime. The LD with the AlInP p-CL shows an about 30 % lower threshold current and 20 % higher efficiency. An output power of more than 1 W per facet was demonstrated at an injection current of 2 A, recommending this structure type for high-power applications. As result of the developments, it is now possible to choose between layer structures with either AlGaAs p-CL or Mg-doped AlInP p-CL, depending on the targeted device layout.

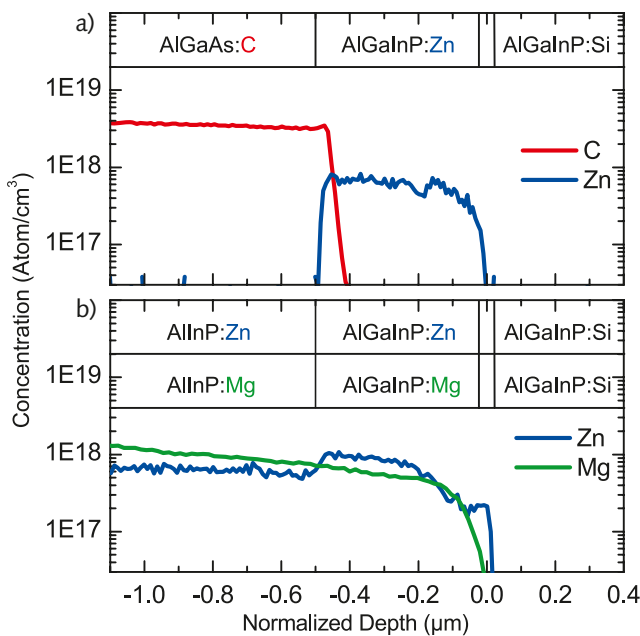
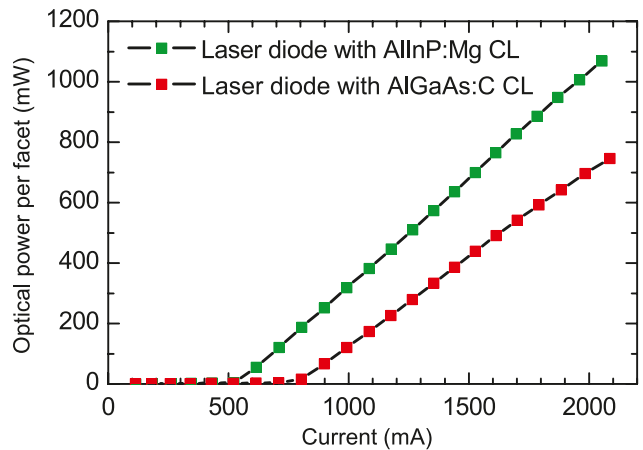


Fig. 2. SIMS measurements: a) laser diode with AlGaAs:C p-CL, b) laser diode with AlInP:Zn p-CL and AlInP:Mg p-CL.

Fig. 3. Power-current characteristics of diode lasers with different p-CLs.



ZUSAMMENFASSUNG

Rot emittierende Laserdioden (LD) mit hohen Ausgangsleistungen und guter Strahlqualität sind aufgrund ihrer Effizienz und Kompaktheit sehr gefragt, beispielsweise für Anwendungen in der Displaytechnologie. Um deren Ausgangsleistung und Effizienz weiter zu erhöhen, wurden die Designs von zwei Schichtstrukturen optimiert. Sie unterscheiden sich durch die Wahl des p-Mantelschichtmaterials und die p-Dotierung.  $\text{Al}_{0,85}\text{GaAs}$  als p-Mantelschicht (p-MS) lässt sich problemlos mit Kohlenstoff dotieren. Zudem kann auf eine etablierte Prozesstechnologie, z.B. für die Einbringung von Gittern zur Wellenlängenstabilisierung, zurückgegriffen werden. AlInP als p-MS bietet eine größere Energielücke im Vergleich zu  $\text{Al}_{0,85}\text{GaAs}$ ; dadurch reduziert sich der Elektronenleckstrom und die Effizienz der Bauelemente ist höher. Magnesium (Mg) anstelle von Zink als p-Dotand führt zu einer Verringerung des Serienwiderstands, erfordert aber die Beherrschung störender Segregations- und Memory-Effekte. Je nach gewünschtem Bauelemente-Layout steht damit die passende Schichtstruktur zur Verfügung: AlGaAs p-CL für wellenlängenstabilisierte Laser oder Mg-dotierte AlInP p-CL für hoch effiziente Bauelemente.

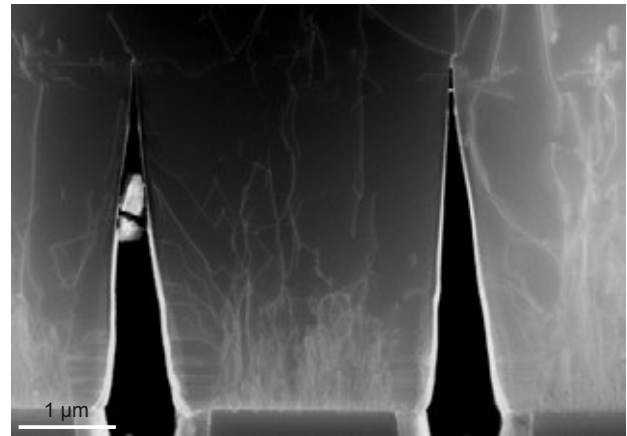
## GROWTH OF ALGaN ON DEFECT-REDUCED ALN ELO TEMPLATES FOR UV LEDs

UV LEDs emitting in the UV-B and UV-C spectral region require transparent  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  buffer layers for efficient light extraction through the sapphire substrate. To increase the crystal quality of this material, maskless epitaxial lateral overgrowth (ELO) of the AlN buffer layer was developed within the activities of the Berlin WideBaSe initiative. A patterned AlN/sapphire template is overgrown by metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE). The pattern consists of stripes with  $1\ \mu\text{m}$  wide grooves and a pitch of  $3\ \mu\text{m}$  running parallel to the  $[1-100]$  direction of AlN. Full coalescence with an overall closed surface and a reduction of threading dislocation density by more than one order of magnitude down to  $5 \times 10^8\ \text{cm}^{-2}$  was achieved. Fig. 1 shows a cross section transmission electron microscopy image of ELO AlN on an AlN/sapphire patterned template illustrating the reduction of the threading dislocation density (dislocations are visible as bright lines). When using such ELO AlN as buffer for an UV-LED emitting at  $295\ \text{nm}$  more than tripled light output power was obtained (see Fig. 2).

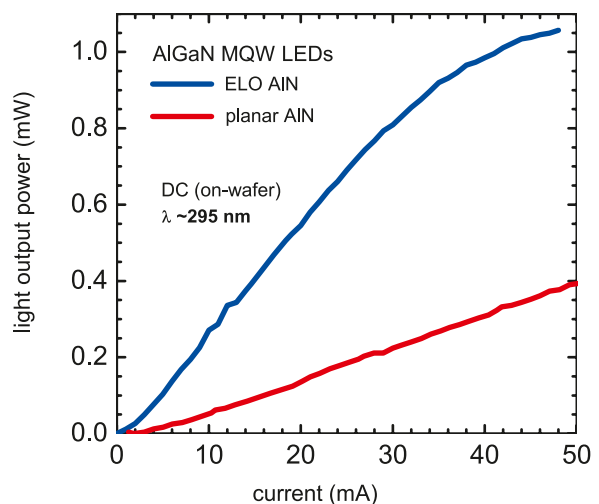
However, when  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  with a nominal composition of  $x = 0.5$  is deposited on ELO AlN, we observe faceted growth with periodic inhomogeneities in the Al content. Fig. 3 shows a cross-section of such a sample with AlN marker layers (dark lines) to illustrate the development of the growth front. It is clearly visible that brighter areas with more Ga originate at surface steps of the ELO AlN buffer (white arrows). Due to the higher surface mobility of the Ga atoms they can reach the surface steps more easily than the Al atoms resulting in Ga-rich growth on the facets. From cathodoluminescence spectra of the same area Al concentrations of  $x = 0.54$  in the flat areas and  $x = 0.45$  on the facets are determined.

This lateral variation of the bandgap should be taken into account when using such layers as buffer layers for bottom-emitting LEDs. To reduce the development of compositional inhomogeneities directly at the origin, the surface morphology of ELO AlN was further investigated using different miscut directions of the sapphire substrate. A miscut of  $0.25^\circ$  to m-direction leads to macrosteps with step heights of about  $15\ \text{nm}$  and a step distance corresponding to the period of the stripe pattern (Fig. 4a). A miscut of  $0.25^\circ$  to a-direction shows no macrosteps and a smooth surface (Fig. 4b).

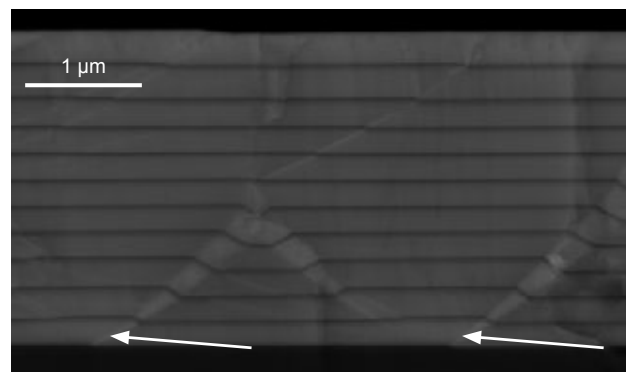
For the realization of UV LEDs in the UV-C spectral region the Al concentration has to be increased to e.g.  $x = 0.8$ . When  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$  layers are grown on smooth



▲ Fig. 1. Cross section TEM image of ELO AlN grown by MOCVD on AlN/sapphire patterned template showing the reduction of the threading dislocation density (dislocations visible as bright lines)

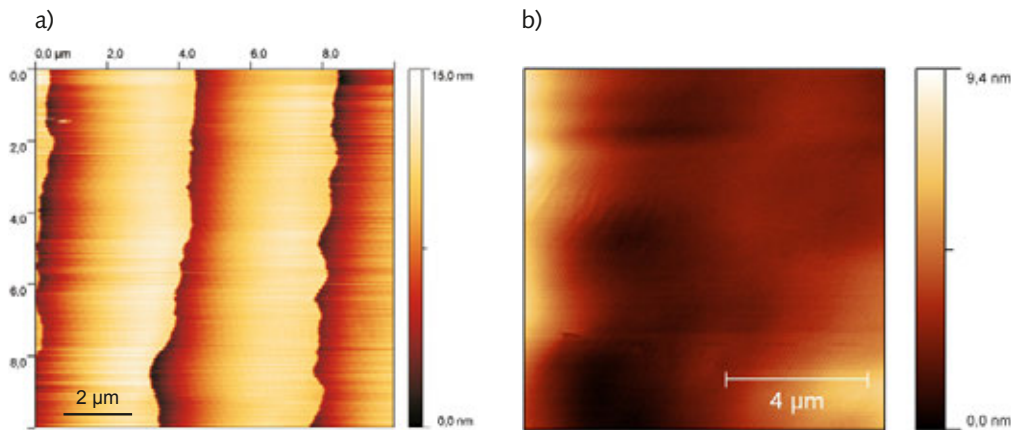


▲ Fig. 2. On-wafer measurement of light output power for an UV LED emitting at  $295\ \text{nm}$  grown on ELO AlN templates and planar templates.



▲ Fig. 3. Backscattered electron image: cross section of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layer with  $x = 0.5$ , dark lines: AlN marker layers illustrating the growth progress; full arrows:  $15\ \text{nm}$  step at ELO-AlN/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  interface.

ELO AlN, they do not show any compositional inhomogeneities and exhibit a symmetrical CL spectrum with a single peak. We were able to achieve n-type conductivity in Si-doped  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$  on ELO AlN resulting in a minimum resistivity of  $0.026 \Omega\text{cm}$ , whereas layers grown on planar AlN/sapphire remain semi-insulating. Therefore, when applying ELO AlN, high quality  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  is available, which can be used as buffer layer for LEDs emitting in the UV-B and -C wavelength regions.



▲ **Fig. 4.** AFM images: surface of an ELO-AlN layer grown on AlN/sapphire template: a) miscut  $0.25^\circ$  to *m*-direction, b) miscut  $0.25^\circ$  to *a*-direction.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Für die effiziente Lichtauskopplung von LEDs, die im UV-B- und UV-C-Bereich emittieren, sind  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Pufferschichten mit hoher Schichtperfektion unerlässlich. Um die erforderliche Qualität zu erzielen, wurde ein Verfahren zum lateralen Wachstum (ELO) von AlN auf strukturierten AlN/Saphir-Unterlagen (Templates) entwickelt. Dieses ermöglicht es, die Versetzungsdichte im AlN um mehr als eine Größenordnung auf  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  zu reduzieren. Die optische Leistung von LEDs, die bei 295 nm emittieren, konnte verdreifacht werden, wenn ihre  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichtstruktur auf diesen Templates gewachsen wurde. Allerdings können Stufen von nur 15 nm Höhe, wie sie auf den AlN-Schichten nach dem ELO-Wachstum häufig zu beobachten sind, zu lateralen Inhomogenitäten in der Al-Konzentration der nachfolgenden  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichten führen. Diese Inhomogenitäten können reduziert oder ganz vermieden werden, wenn Templates mit einem Fehlschnitt des Saphir-Substrates von  $0,25^\circ$  in *a*-Richtung verwendet werden, da hier eine sehr glatte AlN-Oberfläche entsteht. Auf diesen Templates wurden für  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichten mit einem für UV-C-LEDs erforderlichen *x*-Wert von 0,8 keine Inhomogenitäten mehr beobachtet.

#### PUBLICATIONS

A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, M. Weyers, C. Reich, M. Kneissl, "AlGaN layer structures for deep UV emitters on laterally overgrown AlN/sapphire templates", *phys. stat. sol. (a)* 210, 451–455 (2013).

U. Zeimer, V. Kueller, A. Knauer, A. Mogilatenko, M. Weyers, M. Kneissl, "High quality AlGaN grown on ELOAlN/sapphire templates", *J. Cryst. Growth*, vol. 377, 32–36 (2013).

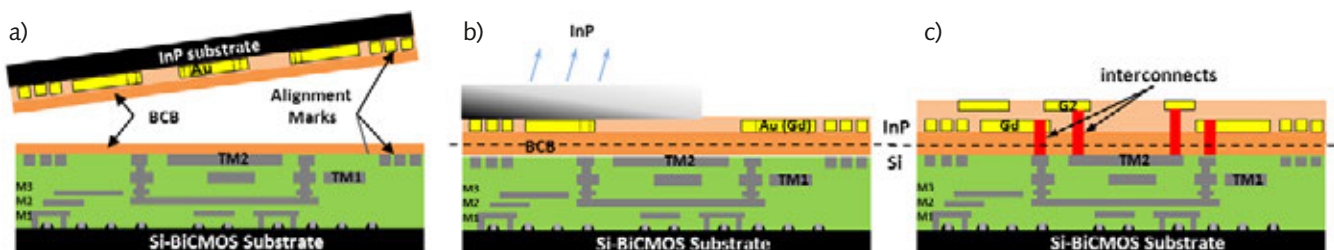
V. Kueller, A. Knauer, U. Zeimer, M. Kneissl, M. Weyers, "Controlled coalescence of MOVPE grown AlN during lateral overgrowth", *J. Cryst. Growth*, vol. 368, 83–86 (2013).

V. Kueller, A. Knauer, C. Reich, A. Mogilatenko, M. Weyers, J. Stellmach, T. Wernicke, M. Kneissl, Z. Yang, C.L. Chua, N. M. Johnson, "Modulated Epitaxial Lateral Overgrowth of AlN for Efficient UV LEDs", *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 24, no. 18, 1603–1605 (2012).

## INTEGRATION OF SiGe BiCMOS AND InP HBT TECHNOLOGY ON WAFER LEVEL

Indium phosphide (InP) hetero-bipolar transistor (HBT) high-frequency circuits fabricated at FBH have been developed to serve RF power and frequency ranges that exceed the performance of silicon devices. On the other hand, silicon as the dominating material in modern semiconductor technology offers unprecedented integration density, complexity, and yield. Thus, combining the benefits of InP and silicon technologies is highly desirable. In order to realize a new class of components that benefit from both technologies, project funding for the Leibniz project Silicon-III-V-Heterointegration for Terahertz-Electronics (HiTeK) was acquired by FBH and the Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP). The aim of the project, which was completed in December 2012, was to establish a technology platform for heterogeneously integrated circuits at terahertz frequencies (0.1–1 THz). Within this demanding HiTeK project, the InP HBT process of FBH has been successfully combined with IHP's silicon-germanium (SiGe) BiCMOS process. Just recently, a follow-up project called "Science Fab" has been approved to stabilize and refine the process and to develop a design kit for internal and external users. Possible applications comprise high-resolution imaging for industrial quality control, medical and security applications, THz imaging, and ultra-high bandwidth communications.

To join both technologies, the transfer substrate process established at FBH for the fabrication of InP DHBT devices offered a unique starting point for heterointegration and system-on-chip strategies. The key step is a wafer bond process by means of BCB (benzocyclobutene). At the beginning of this process, 3 inch InP and 200 mm SiGe BiCMOS silicon wafers are processed independently. Since the BiCMOS production line uses 200 mm wafers, one fully processed 200 mm CMOS wafer delivers four wafers of 3 inch size for compatibility with the InP process line. Both InP and SiGe BiCMOS wafers need to fulfill stringent requirements in terms of a low surface topography. Since a high surface topography would require thick BCB layers for compensation, the achievable alignment accuracy would be poor. For the InP wafer, the ground metallization (Gd) is embedded in BCB in order to obtain a surface topography of less than 100 nm. The silicon wafer topography is reduced by filling the top metal structures with silicon oxide followed by a CMP process at IHP. Prior to wafer bonding, both wafers are spin-coated with BCB. After a BCB curing process, the two wafers are aligned and bonded. In order to achieve excellent broadband properties of the heterogeneous system-on-chip concept, a minimal misalignment of the InP HBT and the SiGe BiCMOS wafers is mandatory. To ensure alignment accuracies better than 10  $\mu\text{m}$ , the wafer bond process was optimized for this application.



▲ **Fig. 1.** Fabrication scheme of the InP-on-BiCMOS process: a) InP and Si wafers are bonded by means of BCB. After InP substrate removal b), further processing from the former InP backside is possible, enabling a via process with short interconnects c).



◀ **Fig. 2.** Homogeneous and void-free 3" wafer bond of heterogeneously integrated InP on top of BiCMOS circuit blocks.

As schematically depicted in Fig. 1, the InP substrate is dissolved by HCl after wafer bonding to expose the HBT structures subsequently. By ICP-RIE dry etching, via holes are formed between the InP and SiGe BiCMOS structures. Since the BiCMOS metallization is based on aluminum, the via process

needs special attention to prevent oxide layers that deteriorate the contact resistance. The InP and SiGe BiCMOS structures are electrically connected by means of a gold electroplating process. Fig. 2 shows the resulting heterogeneously integrated InP-on-BiCMOS wafer bond.

Using this technology, first InP-on-BiCMOS circuits have been realized, which achieve state-of-the-art results and demonstrate the capabilities of the new process. For details see p. 56 of this report.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Um Anwendungsfelder in hohen Leistungs- und Frequenzbereichen abzudecken, wurden zwei bislang getrennte Technologie-Welten in einem Chip vereint. Dazu wurde in einem gemeinsamen Projekt mit dem Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) eine Technologie zur Heterointegration des InP-DHBT-Prozesses des FBH mit dem SiGe-BiCMOS-Prozess des IHP entwickelt. Die zunächst separat vorprozessierten Wafer werden dabei direkt miteinander verbunden. Ein zentrales Element dieser Technologie ist ein Wafer-Bond-Prozess mittels Benzocyclobuten, der hohe Justage-Genauigkeiten liefert. Die kurzen, verlustarmen Verbindungen zwischen den Silizium-Wafern und den Indiumphosphid-Strukturen konnten mittels spezieller Hochfrequenz-Übergänge charakterisiert und nachgewiesen werden. Zahlreiche kombinierte Schaltungen zwischen beiden Technologien bestätigten die erfolgreiche Umsetzung des Konzeptes.

#### PUBLICATIONS

I. Ostermay, F.J. Schmückle, R. Doerner, A. Thies, M. Lisker, A. Trusch, E. Matthus, Y. Borokhovych, B. Tillack, W. Heinrich, T. Kraemer, V. Krozer, O. Krüger, T. Jensen, **"220 GHz Interconnects for InP HBT on SiGe BiCMOS Integration"**, IEEE internat. Microw. Symposium, paper WE2G-1 1010, Seattle (2013).

M. Lisker, A. Trusch, M. Fraschke, P. Kulse, Y. Borokhovych, B. Tillack, I. Ostermay, T. Krämer, F.J. Schmückle, O. Krüger, V. Krozer, W. Heinrich, **"InP-Si BiCMOS Hetero Integration for broadband radio links"**, Smart Systems Integration, Amsterdam (2013).

T. Kraemer, I. Ostermay, T. Jensen, T.K. Johansen, F.J. Schmuckle, A. Thies, V. Krozer, W. Heinrich, O. Krueger, G. Traenkle, M. Lisker, A. Trusch, P. Kulse, B. Tillack, **"InP-DHBT-on-BiCMOS Technology with  $f_r / f_{max}$  of 400 / 350 GHz for Heterogeneous Integrated Millimeter-Wave Sources"**, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 60(7), 2209–2216, DOI 10.1109/TED.2013.2264141 (2013).

T. Kraemer, M. Rudolph, F.J. Schmuckle, J. Wuerfl, G. Traenkle, **"InP DHBT Process in Transferred-Substrate Technology With  $f_t$  and  $f_{max}$  Over 400 GHz"**, IEEE Transactions on Electron Devices, 56 (9), 1897–1903 (2009).

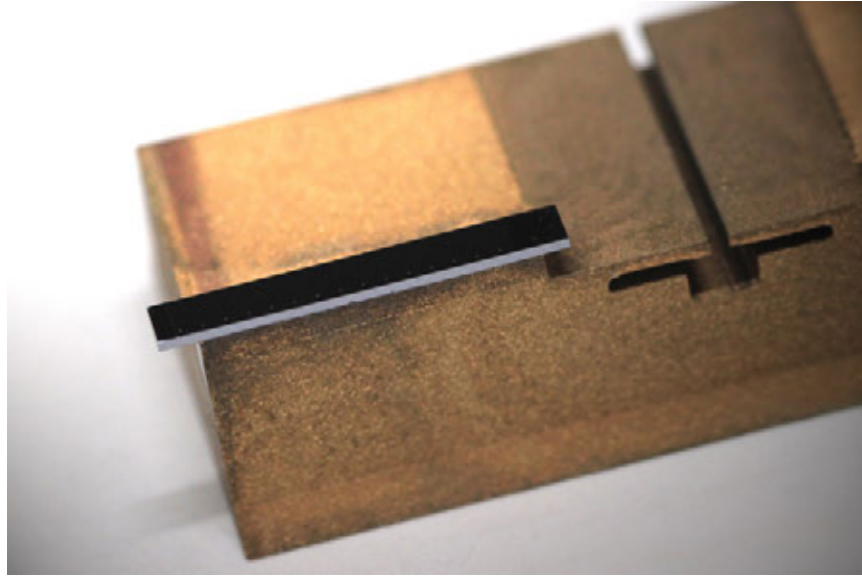
## MICRORESONATORS FOR APPLICATIONS IN OPTICAL SIGNAL PROCESSING AND SENSING

Miniaturization of photonic devices is becoming more and more important in various fields of application, ranging from biological and chemical sensing to optical communications, quantum optics, and fundamental physics. Compact, robust, and hybrid micro-integrated laser-based photonic devices are essential for these applications and even required in space.

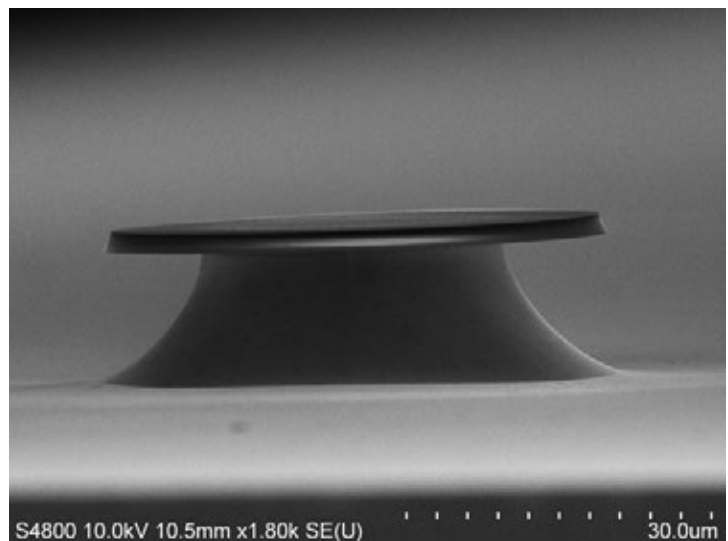
Currently, FBH together with the Humboldt-Universität zu Berlin is making efforts to take hybrid micro-integration one step further within the framework of the AdMiRe project, partially funded by EFRE means. AdMiRe aims at developing microscopic optical resonators and at establishing a reliable, high-yield process technology in order to promote micro-optical resonators from lab demonstrators to tools that are available to a broader community. Goal of the current project is to develop microresonators that are monolithically integrated with appropriate coupling elements and to establish the corresponding process technology—an array of silica microdisk resonators can be seen in Fig. 1. For the long term, however, hybrid integration of silica chips together with GaAs laser chips shall be achieved to provide ultra-compact and robust laser systems for field- and space-based applications.

The optical resonators investigated are silica disks that guide and store light in so-called “whispering gallery modes”. The typical diameter of the disks corresponds to a few  $10\ \mu\text{m}$ . Due to the excellent optical properties of the material and an elaborated process technology, light can be stored long enough to provide optical resonators with a linewidth of only a few 100 MHz. This feature, in turn, is attractive for various applications. FBH produces diverse resonators in the range from  $50\ \mu\text{m}$  to  $500\ \mu\text{m}$  diameter and thicknesses from  $1\ \mu\text{m}$  to  $2\ \mu\text{m}$  (see Fig. 2). The material stack is oxide on silicon that is either deposited by plasma-enhanced physical vapor deposition or by high-temperature oxidation of the silicon wafer. In a first step, alignment and overlay structures are made. Then, the resonator structures are defined by means of a lithographical process in a photo resist, followed by plasma etch in a RIE etching process to transfer the structures into the oxide. The underetch required to free the perimeter of the disks is performed with wet-chemical etch solutions.

At FBH, a test stand for the optical characterization of such microresonators was developed. A spectroscopy laser system was set up, offering a relative and absolute accuracy better than 1 MHz in the frequency range of 765–781 nm. In the microresonator, whispering gallery modes are excited by means of evanescent coupling with a tapered optical fiber. These modes are confined in circular structures, such as disks and spheres, and exhibit a unique combination of extremely high Q-factors and very small mode volumes. An external cavity laser is used to



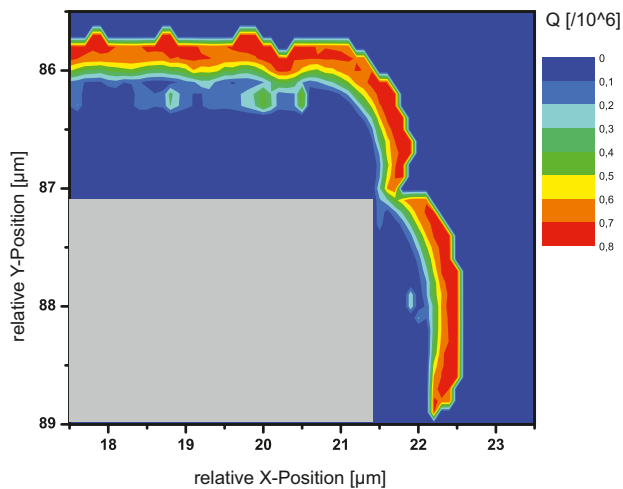
▲ Fig. 1. Silicon chip with an array of 15 identical silica microdisk resonators on a sample holder ready for optical characterization.



▼ Fig. 2. Microdisk resonator with a radius of  $40\ \mu\text{m}$  and a thickness of  $2\ \mu\text{m}$ .

measure parameters such as free spectral range, quality factor, and coupling efficiency. Therefore, the distance between tapered fiber and optical resonator must be controlled with a precision better than 100 nm. The tapered fibers are produced by our project partners, the nano photonics group at Humboldt-Universität zu Berlin. This enables us to analyze and to improve our fabrication technology by employing a fast feedback loop between optical characterization and processing. The achieved quality factors are in the order of  $10^6$ . Fig. 3 depicts the spatial dependence of the coupling process on the relative position of tapered fiber and optical microresonator, as measured in automated mode on the test stand in our lab.

Recently, we demonstrated a "post process" technique, which enables fine tuning of the resonance frequency of an optical microresonator to any frequency in the free spectral range. This technique vastly improves the usability of optical microresonators in experiments where a certain optical frequency must be matched with high precision, i.e. coupling a single photon source directly to a high-Q resonator.



◀ **Fig. 3.** Map of the quality factor of a silica disk (position indicated as grey box; thickness  $2\ \mu\text{m}$ , diameter  $0\ \mu\text{m}$ ) in dependence on the position of the probing fiber taper.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Miniaturisierung photonischer Bauelemente gewinnt in vielfältigen Anwendungen an Bedeutung, etwa bei biologischen und chemischen Messungen, der optischen Kommunikation, Quantenoptik und selbst in der Grundlagenphysik. Dafür werden kompakte, robuste und zuverlässige Module benötigt, die sogar in extrem rauen Umgebungen wie im Welt- raum reibungslos funktionieren. Im Hinblick auf die weitere Miniaturisierung entwickelt das FBH zusammen mit der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB) mikro-optische Reso- natoren. Diese werden im Reinraum des FBH als Scheiben mit wenigen  $10\ \mu\text{m}$  Durchmes- ser und Dicken von nur  $1\text{--}2\ \mu\text{m}$  hergestellt. Anschließend werden die Resonatoren am FBH mit einem speziellen Teststand charakterisiert, mit dem im Wellenlängenbereich von  $765\text{--}781\ \text{nm}$  mit einer Genauigkeit besser als  $1\ \text{MHz}$  gemessen werden kann. Die dazu nötigen dünn ausgezogenen Glasfasern kommen von der HUB, ebenso wie wesentliche Aspekte des Designs. Damit entstehen aus dieser Kooperation miniaturisierte Resonatoren mit einer sehr hohen optischen Güte.

## PUBLICATIONS

R. Henze, C. Pyrlík, A. Thies, J. M. Ward, A. Wicht, O. Benson, "Fine-tuning of whispering gallery modes in on-chip silica microdisk resonators within a full spectral range", Appl. Phys. Lett. 102, 041104, DOI: 10.1063/1.4789755, (2013).

J. Ward, R. Henze, M. Gregor, C. Pyrlík, A. Wicht, A. Thies, A. Peters, S. N. Chormaic, O. Benson, "Integrated Whispering-Gallery Mode Resonators for Fundamental Physics and Sensing Applications", Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV, edited by A. V. Kudryashov, A. H. Paxton, V. S. Ilchenko, L. Aschke, K. Washio, Proc. of SPIE Vol. 8236, 82361C, DOI: 10.1117/12.914712, (2012).

## PROCESSING AND THERMAL MANAGEMENT OF TERAHERTZ QUANTUM-CASCADE LASERS

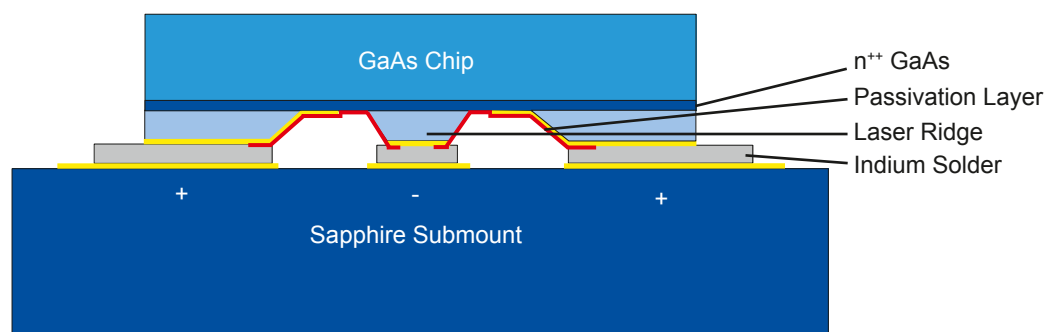
Compact and narrowband sources for terahertz (THz) radiation with output powers above 1 mW and low power consumption of a few Watts are needed for various applications. These include imaging, wireless communication, spectroscopy, and astrophysics as well as biological, atmospheric, and medical sciences. Semiconductor-based quantum-cascade lasers (QCLs) for terahertz generation are good candidates to satisfy such requirements.

In a joint ProFIT project, partially funded by EFRE, the FBH aims at developing a technology basis for the reliable fabrication of THz QCLs. Project partners are Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI), German Aerospace Center (DLR), Humboldt-Universität zu Berlin, and eagleyard Photonics. In a first step, applications in spectrometers for space- and airborne missions, such as SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy), are in focus. The implementation of tunable and small THz QCLs as local oscillators in the heterodyne receiver GREAT (German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies) on board of SOFIA allows for more compact, more energy efficient, and easy-to-use systems. However, the maximum operating temperature ( $T_{\max}$ ) of THz QCLs in continuous wave (cw) operation is considerably below room temperature, with a current record value at  $T_{\max} = 130$  K. The operation expense necessary for cooling is still an obstacle for commercial viability of THz QCLs. Therefore, further advances of  $T_{\max}$  toward room temperature operation are obligatory.

At FBH, benefits from efficient heat extraction by epitaxial-side, as opposed to substrate-side, heat sinking are explored. Although such kind of mounting scheme is well established in high-power diode laser assembly, it has not been developed for THz QCLs so far. We realized an epitaxial-side (epi-down) mounting scheme for GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  THz QCLs on sapphire submounts using indium solder. The stressless assembly provides efficient heat dissipation at cryogenic temperatures and high stability against thermal cycling. Thermal finite elements method simulations were performed for different material combinations, including silicon, gallium arsenide, copper, and sapphire. Based upon these results, sapphire was selected as submount material. Targeting at operating temperatures of 50–70 K, sapphire provides highest thermal conductivity, which is even higher than copper. Sapphire also exhibits the lowest mismatch of the thermal expansion coefficients, except GaAs itself, which minimizes undesired stress on the laser structure.

The submounts were fabricated in a wafer-level process from polished 2" sapphire substrates. Standard photolithography, electron beam physical vapor deposition, and subsequent metal lift-off was used for patterning electrical interconnects. Indium solder was deposited by an optimized evaporation process to obtain very smooth layers with good wetting properties for subsequent soldering. Submounts of  $6 \times 6$  mm<sup>2</sup> were separated from the wafer by laser scribing followed by cleaving.

The GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  QCL structures with an Al content of  $x = 0.18$  were grown by molecular beam epitaxy at PDI. Processing of single-plasmon ridge waveguide structures was performed at FBH. Additional ridges were formed to redirect the bottom contacts to the same plane as the



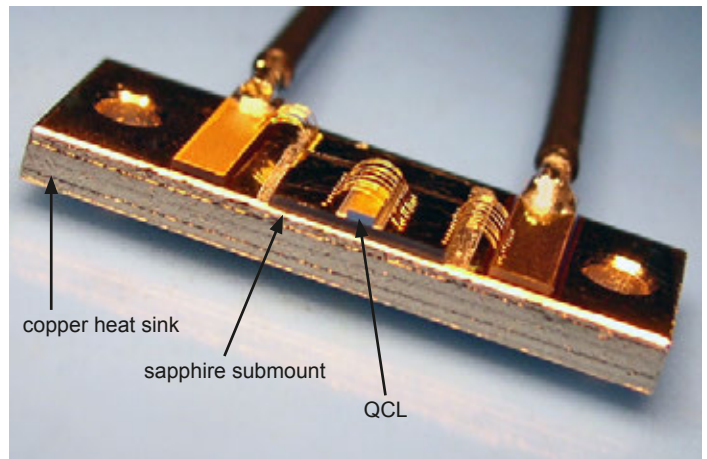
▲ **Fig. 1.** Schematic cross-section of the chip-on-submount assembly for epitaxial-side heat sinking (not to scale).



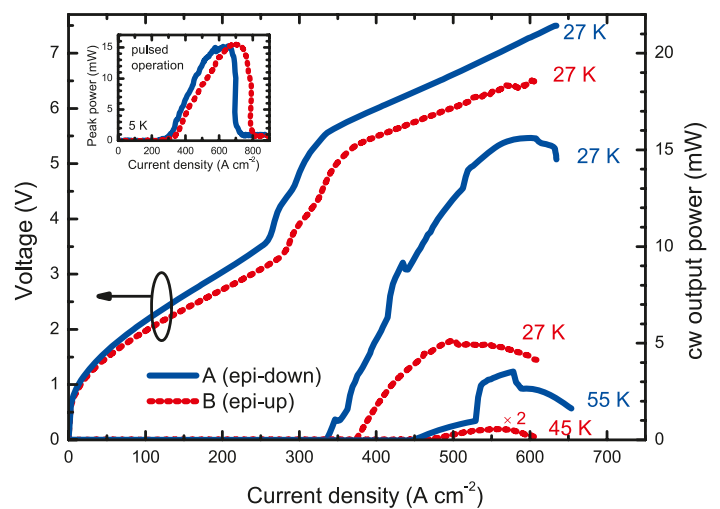
top ones. The wafers were cleaved into individual QCL chips that were soldered with their epitaxial-side onto submounts. A cross-section of the resulting chip-on-carrier assembly is schematically shown in Fig. 1. Finally, the chip-on-submount assemblies were soldered with In/Sn onto copper heat sinks (Fig. 2). The laser emits in the range of 3.1–3.3 THz, exhibiting single-mode emission close to the threshold. Typical Fabry-Perot spectra at elevated driving currents indicate an intact resonator, i.e. thermal stress during cool-down did not damage the epi-down laser ridge.

Fig. 3 exemplarily depicts the light-current-voltage (LIV) characteristics for cw operation of lasers in two mounting configurations, epi-down (stripe A) and epi-up (stripe B). Both laser stripes belong to the same processed part of the wafer and have similar dimensions. At the same heat-sink temperatures, the epi-down mounted sample always achieves significantly larger levels of cw output power than the epi-up configuration. In cw operation the maximum operating temperatures of samples A and B are 55 K and 45 K, respectively. In pulsed mode both lasers achieve an output power of 15 mW at 5 K as well as a similar maximum operating temperature of about 95 K. Thus, the larger output power and the larger maximum operating temperature of sample A during cw operation are clearly a consequence of the improved thermal management by epi-down mounting. The larger operating voltage, and hence a larger Ohmic heating, in case of epi-down mounted lasers is subject of current investigation. Improvements of the layouts are in progress.

The work is supported in part by the European Commission (EFRE) through the ProFIT program of the Investitionsbank Berlin.



▲ Fig. 2. THz QCL mounted epi-down on sapphire submount and copper heat sink.



▲ Fig. 3. LIV characteristics of epi-down (A) and epi-up (B) mounted samples (cw operation) measured by PDI; ridge width: 135  $\mu\text{m}$  (A), (B), ridge lengths: 1.70 mm (A), 1.58 mm (B). Inset: light-current characteristics for pulsed operation (500 ns, 5 kHz, 0.25 % duty cycle) at 5 K.

## ZUSAMMENFASSUNG

Quantenkaskadenlaser (QCL) zur Erzeugung von Terahertz-Frequenzen (THz) sind vielversprechende Strahlungsquellen für verschiedene Anwendungen. Dazu gehören bildgebende Verfahren in der Materialdiagnostik, Applikationen im Bereich der drahtlosen Kommunikation, Spektroskopie und Astrophysik sowie Biologie, Atmosphärenforschung und Medizin. In einem Verbundvorhaben sollen abstimmbare THz-QCL in das Spektrometer GREAT (German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies) implementiert werden. Dieses Messgerät ist für raumschiff- und flugzeuggestützte Einsätze, wie z.B. SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy), vorgesehen. Ziel ist es, den hohen Kühlaufwand für THz-QCL zu reduzieren – sie lassen sich zurzeit nur deutlich unter Raumtemperatur betreiben. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für ihren kommerziellen Einsatz. Am FBH werden daher die Vorteile einer effizienten Entwärmung durch epitaxiales („epi-down“) Montage auf eine Wärmesenke untersucht. Durch diesen Aufbau lässt sich die maximale Betriebstemperatur im cw-Betrieb um circa 10 K auf 55 K erhöhen.

## PUBLICATION

O. Krüger, S. Kreuzmann, D. Prasai, M. Wienold, R. Sharma, W. Pittroff, L. Weichselbaum, W. John, K. Biermann, L. Schrottke, F. Schnieder, G. Erbert, H.T. Grahn, G. Tränkle  
**"Improved Thermal Management of Terahertz Quantum-Cascade Lasers by Epitaxial-Side Heat Sinking"**, IEEE Photon. Technol. Lett., DOI: 10.1109/LPT.2013.2271323, in press (2013).

## HIGHLY RELIABLE SILICON CARBIDE PHOTODETECTORS

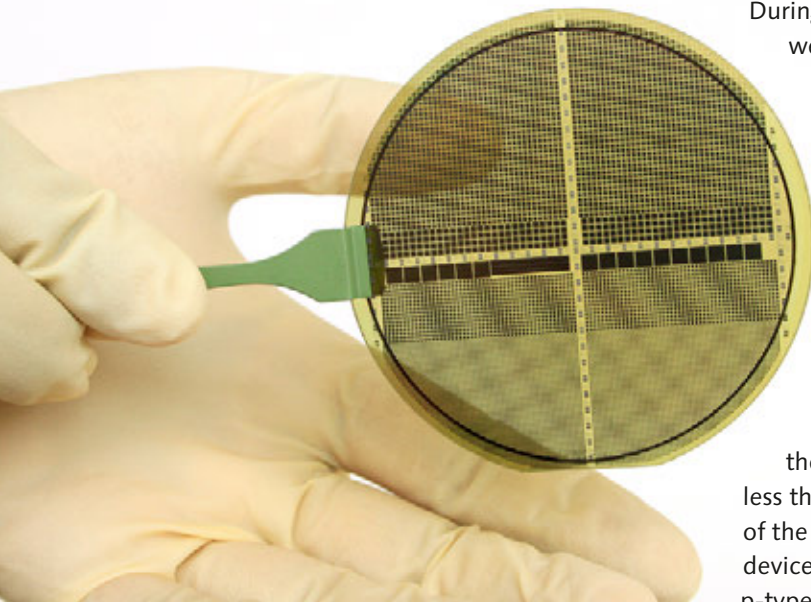
Silicon carbide (SiC) based photodetectors rank among the most efficient semiconductor ultraviolet (UV) detectors currently available in the UV range between 200 nm and 380 nm. UV photodetectors made from wide-bandgap semiconductors such as SiC enable operation at room temperature and provide intrinsic visible blindness. This feature is, for example, required to detect low UV radiation even in highly intense visible or infrared ambient light (visible blindness above  $10^4$ ). Due to the commercialization of SiC devices, reliability issues have attracted more and more attention. Increasing requirements for highly reliable semiconductor devices continuously motivate improvements in device designs as well as in processing technology to provide a robust basis for high yield and reproducibility. A growing variety of applications for detectors of UV radiation depend on highly reliable and long-term stable detection systems. Such applications include food, air and drinking water purification, flame and combustion control as well as chemical and biological analysis or sterilization of biological and medical equipment. UV dose control systems in germicidal and bactericidal UV applications call for UV photodiodes that are long-term stable under UV irradiation.

Highly efficient and reliable SiC p-n photodiodes were fabricated in cooperation with the Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ) and the Berlin-based company sglux GmbH. The photodiodes on n-type substrates and their long-term behavior under different conditions of highly intense UV exposure were characterized by sglux and Physikalisch-Technische Bundesanstalt. The 4H-SiC epitaxial layers were grown at IKZ by chemical vapor deposition on commercially available n-type 4H-SiC substrates with a diameter of 76 mm. At FBH, the technology to produce photo detectors with different chip dimensions of up to  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  has been developed. Finally, the processed wafers as exemplarily shown in Fig. 1 are delivered to sglux.

Photodiode chips packaged in TO housings with UV-transparent window were characterized. At room temperature, devices with an active area of  $0.06 \text{ mm}^2$  exhibit a dark current of 0.2 fA at 1V reverse bias. For stability tests, SiC devices were exposed to UV light for a long time and with a high radiation intensity. Separate aging studies were conducted at room temperature with low-pressure and medium-pressure mercury lamps. Both types of lamps were chosen because they are commonly used to kill germs in air and liquids.

Aging experiments with a low-pressure mercury UV-C lamp were performed over 16,000 hours, totaling to a dose of  $58 \text{ kJ/cm}^2$ .

During irradiation stress, the devices were operated in short-circuit mode, and their photocurrent was regularly measured. The results of the 22 months long-term stress experiment at  $4.2 \text{ mW/cm}^2$  exposure by a low-pressure UV-C lamp are shown in Fig. 2. Within the first 72 hours of the irradiation, the 4H-SiC p-n diodes exhibit a burn-in effect, i.e. the responsivities decrease by less than 4%. For comparison, two of the previously available 6H-SiC devices (CREE CD2600.30D, on p-type SiC substrates) were tested



◀ **Fig. 1.** UV photo diodes on 3" SiC wafer.

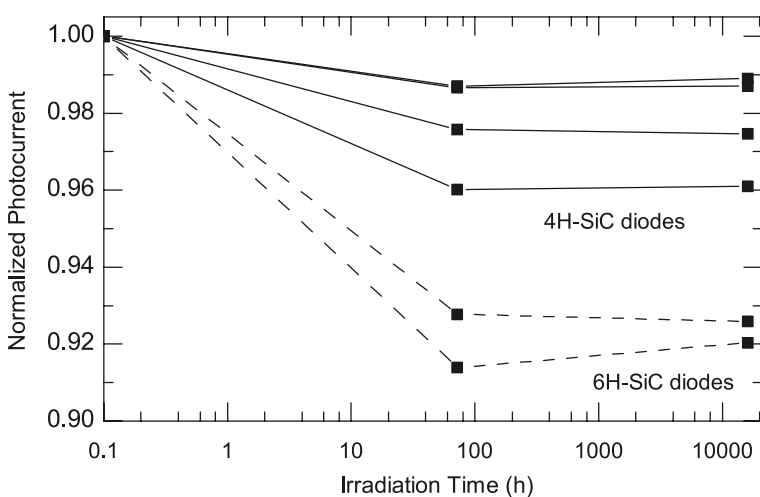
in parallel under identical stressing conditions. Their responsivities dropped by less than 9 % (see Fig. 2). After initial burn-in, no significant degradation is detectable for all devices within the accuracy of the measurement equipment. All devices remain fully functional after 16,000 hours of UV irradiation and provide more than 95 % of their initial photocurrent.

A second group of devices was irradiated by a medium-pressure mercury discharge lamp. The devices were exposed for 93 hours, totaling to a UV dose of 5.7 kJ/cm<sup>2</sup>. Photocurrent characterization was executed at the beginning, after 42, 64, and 93 hours as shown in Fig. 3. Again, the stressed devices also exhibit a decrease of the photocurrent response of less than 5 % within 93 hours of exposure. This value corresponds with the ones observed in the long-term stress test under low-pressure UV-C lamp irradiation. All results confirm that the devices are long-term stable under highly intense UV light irradiation: after an initial burn-in period, no measurable degradation has been detected, which makes the devices excellent candidates for high irradiance UV detector applications. The aging tests confirm that the 4H SiC p-on-n photodiodes are robust and suitable for high-irradiance UV applications.

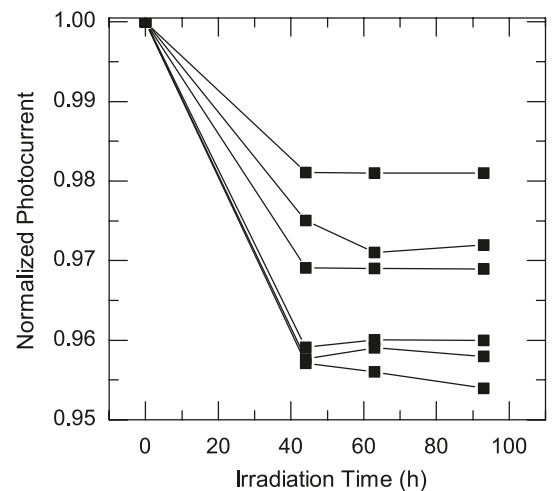
Part of the work was funded by the Transfer BONUS program of Berlin's Senate Department for Economy, Technology and Women.

#### PUBLICATION

D. Prasai, W. John, L. Weixelbaum, O. Krüger, G. Wagner, P. Sperfeld, S. Nowy, D. Friedrich, S. Winter, T. Weiss, "Highly reliable SiC photodiodes for visible blind UV detector applications", *J. Mater. Res.*, vol. 28, no. 1, 33–37 (2013).



▲ Fig. 2. Normalized photocurrent of SiC UV photodiodes stressed with a low-pressure UV-C lamp. After burn-in no degradation of photocurrent could be measured.



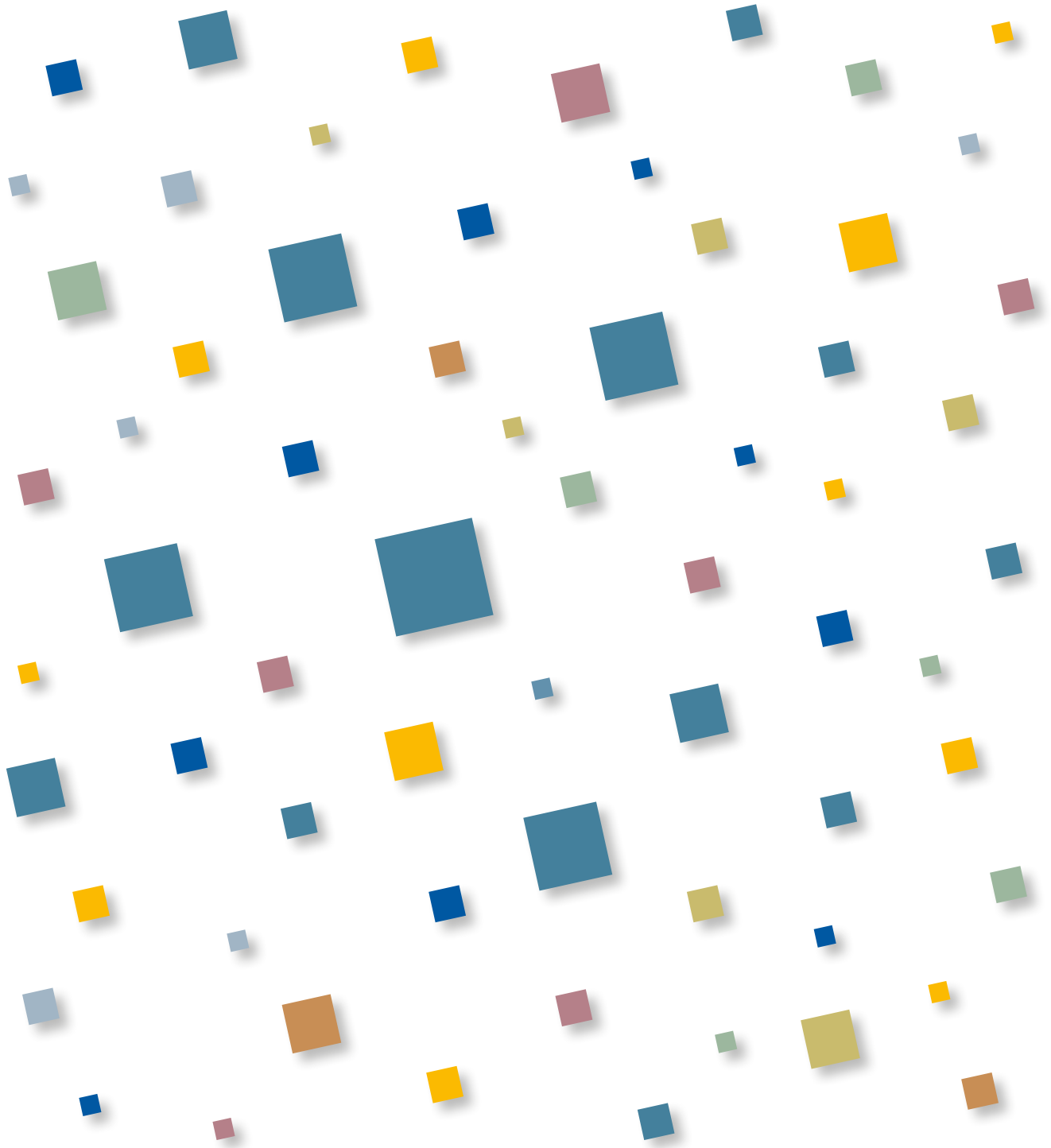
▲ Fig. 3. Normalized photocurrent of 4H-SiC UV photodiodes stressed with a medium-pressure UV lamp.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Photodetektoren aus Siliziumcarbid (SiC) gehören zu den effizientesten Halbleiterdetektoren für ultraviolette (UV) Strahlung zwischen 200 und 380 nm. Sie sind im sichtbaren Spektralbereich unempfindlich und können bei Raumtemperatur betrieben werden. Eine wachsende Anzahl von Anwendungen, bei denen beispielsweise die UV-Dosis überwacht und gesteuert werden muss, stellt hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität. Zusammen mit dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung und der Berliner Firma sglux wurden p-n-Photodioden auf 3-Zoll n-SiC-Substraten hergestellt. Die Bauelemente wurden bei sglux und an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Langzeittests unterschiedlicher, hochintensiver UV-Strahlung ausgesetzt. In den Alterungstests zeigte sich ein anfänglicher Abfall des Photostromes um < 5 % („burn-in“-Verhalten), danach war kein signifikanter Abfall mehr nachweisbar. Alle Bauelemente waren auch nach 16.000 Stunden UV-Bestrahlung voll funktionsfähig und lieferten mehr als 95 % des anfänglichen Photostromes. Damit konnte die hohe Langzeitstabilität gegenüber intensiver UV-Strahlung nachgewiesen werden.



# SCIENCE MANAGEMENT WISSENSCHAFTSMANAGEMENT



# WISSENSCHAFTSMANAGEMENT

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.

Die Anforderungen an die wissenschaftsunterstützenden Bereiche, insbesondere in der Verwaltung und beim Reporting, steigen: Datenabfragen, Forschungsratings und Programmbudgets, aber auch die Verwaltung von Drittmittelvorhaben unterschiedlichster Zuwendungsgeber erfordern professionelles Management. Um die wissenschaftsunterstützenden Aufgaben und den Informationsfluss weiter zu bündeln, wurden die zentralen Bereiche Verwaltung und EDV Mitte des Jahres der Abteilung Wissenschaftsmanagement zugeordnet. Auch das Dienstleistungsangebot wurde in diesem Zusammenhang weiter ausgebaut. So wurde beispielsweise ein System zur Reklamationsbearbeitung bei der Beschaffung von Anlagen und Geräten entwickelt und implementiert. Dabei unterstützt die Abteilung Wissenschaftsmanagement die wissenschaftlichen Bereiche im Fall von Lieferproblemen, unvollständigen oder nicht akzeptablen Lieferungen. Die neue Säule Verwaltung und EDV ordnet sich neben den bereits etablierten Bereichen Strategie, Technologietransfer & Marketing sowie Bildung ein.

Im Cluster Optik der Länder Berlin-Brandenburg unterstützt die Abteilung den Institutsdirektor Günther Tränkle in seiner Funktion als Clustersprecher und beim Clustermanagement. Da die Mikrosystemtechnik ein Handlungsfeld des Clusters darstellt, fließen hier auch die Aktivitäten der im Wissenschaftsmanagement angesiedelten Geschäftsstelle des Zentrums für Mikrosystemtechnik Berlin (ZEMI) ein. Auch die Geschäftsstellen des innovativen regionalen Wachstumskerns ‚Berlin WideBaSe‘ und des Ausbildungsnetzwerks Hochtechnologie Berlin (ANH Berlin) werden von der Abteilung gemanagt. Das Institut profitiert vor allem von der engen Vernetzung mit Partnern aus Forschung und Wirtschaft sowie der verstärkten Sichtbarkeit innerhalb des jeweiligen Themenfeldes.

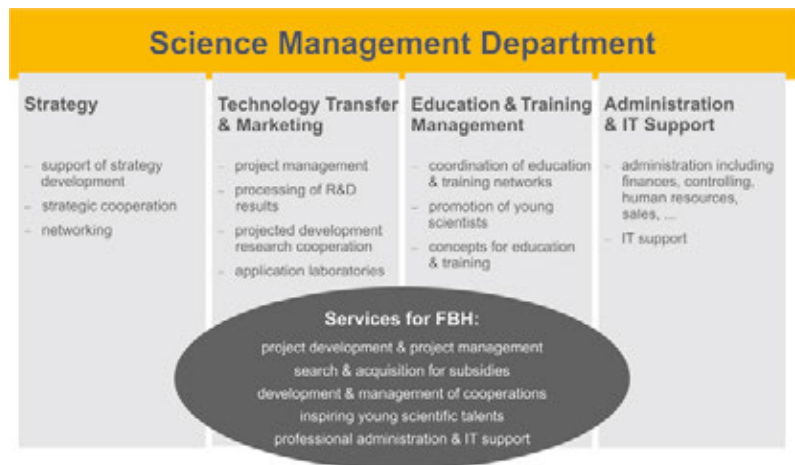
In diesem Zusammenhang organisierte die Abteilung 2012 zwei wissenschaftliche Veranstaltungen: Auf der Messe Laser Optics Berlin fand im März der erste „German-Polish Workshop on Nitride-Semiconductors“ im Kontext des regionalen Wachstumskerns Berlin WideBaSe statt. Dieser Workshop mit über 40 Beteiligten – vorrangig aus Berlin und Warschau – war der Auftakt für einen regelmäßigen Austausch und daraus resultierende gemeinsame Kooperationsvorhaben. Bereits zum siebten Mal veranstaltete ZEMI 2012 die einwöchige Microsystems Summer School Berlin. Unter dem Motto „Mikrosystemtechnik im Dienste des Menschen“ präsentierten sich die ZEMI-Partnereinrichtungen gemeinsam mit Unternehmen den 24 Teilnehmenden.

Im Bereich Bildung stehen weiterhin die Aktivitäten rund um die Nachwuchswerbung und -förderung im Vordergrund. Durch die Partnerschaft im ZEMI und die hiermit verbundene Mitgliedschaft im Nationalen Pakt für Frauen in MINT-Berufen konnte das Vorhaben mst|femNet erfolgreich fortgeführt werden. Zudem organisierte das FBH den dritten Berlin-Brandenburger Mädchen-Technik-Kongress, an dem 240 Mädchen teilnahmen. Insbesondere junge Mädchen sollen sich dadurch frühzeitig für Qualifizierungs- und Karrieremöglichkeiten im Hochtechnologie-Sektor begeistern.

# SCIENCE MANAGEMENT

The Science Management Department advises and supports the director and FBH scientists in terms of strategy regarding industrial projects, project funding, and in establishing R&D co-operation. By positioning the institute in local, regional, national, and international networks, the department helps increasing the public visibility of the FBH. Also, research and industrial partners benefit from these activities. The interdisciplinary team carries out administrative and non-scientific work related to applications of complex collaborative projects, coordination of national and international project clusters, as well as in the development and management of such projects.

The demand for science-supporting services, particularly in terms of administration and reporting, increases: data queries, research ratings, program budgets, but also the management of third-party projects financed by various funding parties require professional management. To bundle scientific support functions and information flow, the central service units administration and IT support were assigned to the Science Management Department in mid-2013. The range of services has also been further enhanced in this context. A system to handle complaints related to purchasing of equipment, for example, was developed and implemented. This way, the Science Management Department supports scientific areas in case of delivery problems as well as incomplete and unacceptable deliveries. The new column administration & IT support supplement the already established areas strategy, technology transfer & marketing, and education & training.



In the Photonics Cluster of the Capital Region Berlin Brandenburg, the department supports Günther Tränkle in his function as cluster spokesman and in cluster management. Since microsystems technology represents one field of cluster activity, endeavors of the branch office of the Centre for Microsystems Technology (ZEMI), which is located at the FBH, converge. Additionally, the branch offices of the innovative regional growth core Berlin WideBaSe and the Education Network High Technology Berlin (ANH Berlin) are managed by FBH's Science Management Department. The institute mainly benefits from close networking with partners from research and industry and from improved visibility within the respective subject area.

In 2012, the department organized two scientific events in this context: During Laser Optics Berlin exhibition in March, the first "German-Polish Workshop on Nitride Semiconductors" was held within the frame of Berlin WideBaSe activities. The workshop with over 40 participants—mainly from Berlin and Warsaw—was the kick-off for a regular exchange and prospective joint projects. Additionally, the seventh Microsystems Summer School with 24 participants was organized by ZEMI. Under the motto "Microsystems Technology at the Service of Human Beings", the ZEMI partner institutions presented themselves together with local companies in Berlin.

In the education & training field, recruitment and promotion of young people was the main focus of activities. Due to the ZEMI partnership, related with the membership in the National Pact for Women in MINT Careers, the project mst|femNet could be successfully continued. Additionally, FBH organized the third Berlin-Brandenburg girls' technology congress with 240 girls participating. Thus, especially young girls shall be inspired for training and career opportunities in the high technology sector already at an early stage.

## CREATING VALUE FROM KNOW-HOW, RESEARCH RESULTS, AND INTELLECTUAL PROPERTY

The FBH is well known for its comprehensive know-how and excellent research results. To provide the institute with appropriate financial resources, public and private funding is one crucial basis. So, the main task of the FBH technology transfer staff is to assist scientists initiating R&D projects and collaborations with industrial partners and thus to broaden the scope of action for FBH science.

To support specific research activities at FBH, the technology transfer staff evaluates and summarizes the announcements of relevant calls that are published regularly to make them available to the scientists. Additional consultation service is provided to acquire public and industrial funding in order to process research tasks. The team supports FBH scientists with project development and applications as well as with taking over management tasks in running projects. This allows coordinators, scientific colleagues, and also project partners to stay focused on technological project content and aims.

### Expansion of technology transfer by application laboratory

Achieving excellent research results is no end in itself. To make them usable for innovative applications and bring them into the market, FBH must find the appropriate industrial partners. However, experience in technology transfer has shown that output gained during research—like diagrams, characteristics, and laboratory samples—is often not applicable for sales-oriented marketing purposes. By starting pilot projects in its application laboratory in 2009, FBH met this challenge and could thus broaden its range of R&D services. Examples are further developments of a stand-alone pulse laser system comprising a picosecond light source with integrated pulse picker and a probe system for high frequency measurements. FBH is now aiming to expand these activities by further developing laboratory models into functional models for practical usage. It complements the institute's expertise in specific technologies and components by competencies in systems.

### Berlin WideBaSe

Berlin WideBaSe continued its research and development activities on wide bandgap semiconductors in 2012. The network joins forces of ten enterprises and three research institutions in the Berlin Brandenburg region, covering the whole value chain in this application field. FBH is involved in seven of a total of eight projects, with its Science Management Department being additionally responsible for the overall management and coordination.

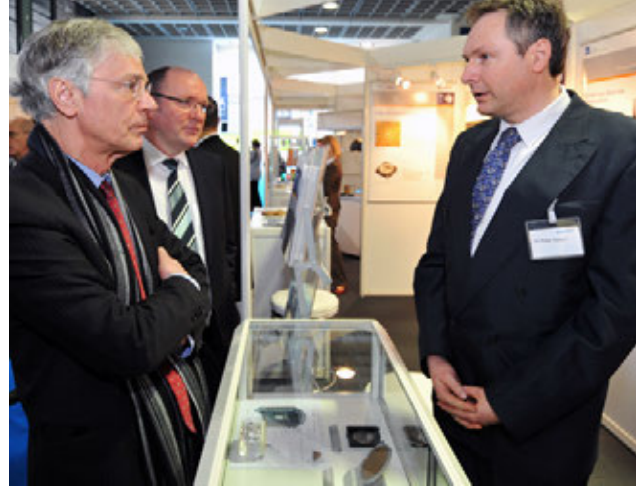
In March 2012, the consortium presented its activities and achievements at Laser Optics Berlin (LOB) / microsyst. Five partners participated at the booth that was not only visited by expert audience, but also politicians—among them the Berlin State Secretaries Dr. Knut Nevermann (Science) and Nicolas Zimmer (Economy, Technology and Research). In the frame of the fair, Berlin WideBaSe additionally hosted the "German-Polish Workshop on



◀ Berlin WideBaSe booth at Laser Optics Berlin 2012.



Nitride-Semiconductors". Speakers from Warsaw and Berlin WideBaSe informed more than 40 participants about the current status of their R&D work on substrate materials and optoelectronic devices based on nitride semiconductors. While the Polish partners concentrated on laser diodes and mono-thermally grown GaN substrates, the focus of the Berlin WideBaSe network was on AlN/GaN substrates (HVPE) and LEDs. A similar follow-up workshop has been held in April 2013 with Berlin WideBaSe experts visiting Warsaw.



### MedUSE—sectoral-oriented valorization

MedUSE, funded by the BMBF, aims to use FBH's know-how, research results, and intellectual property as innovation drivers in three application fields: medical, environmental, and sensor technology. In collaboration with Ascenion GmbH, a company advising public research institutions in all aspects of intellectual property asset management, FBH is developing, implementing, and professionalizing a sectoral-oriented valorization. In this context, four specific technology offers have been developed within the project, including compact laser modules for spectroscopy and UV LEDs for bioanalytics. These offers provide condensed information about research results and services of FBH in the targeted application areas. They proved to be useful instruments to initiate cooperation at exhibitions and conferences.

▲ State Secretary Knut Nevermann (l.) gathering information about Berlin WideBaSe activities.

### Purchasing, tracing, and mediation

Excellent laboratory equipment is an important precondition to achieve state-of-the-art R&D results. In 2012 alone, FBH invested about 4.1 million € in the renewal and new acquisition of facilities, devices, and instruments. In a few cases, suppliers were not able to deliver in due time, either completely or not with all predefined specifications. To support scientists and to safeguard the interests of the institute, the team analyzes the processes of tender, offer, order, delivery and implementation and then contacts the supplier to fix amendments within a specified time limit. If the supplier is not able to achieve the substantial specifications during a reasonable period, consequences are drawn. The Science Management Department team evaluates problematic cases to find efficient and universally applicable solutions for frictionless purchasing and to implement them into quality management procedures.

## ZUSAMMENFASSUNG

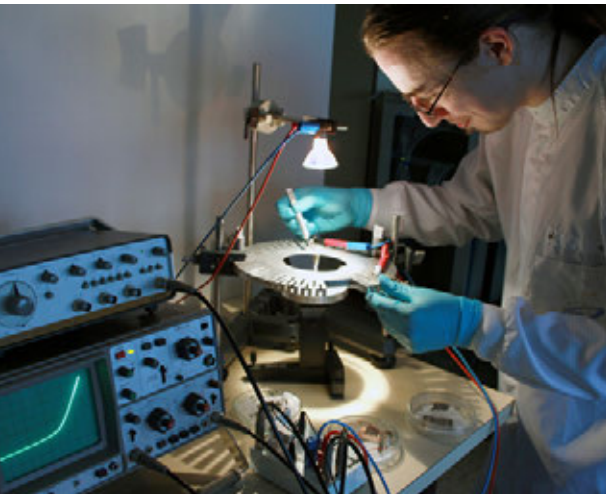
Die Abteilung Wissenschaftsmanagement unterstützt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler seit Jahren erfolgreich bei Projektentwicklungen und Unternehmenskooperationen. Daneben wurden 2012 eigene strategische Vorhaben entwickelt und betreut, die vor allem auf die Unterstützung der Forschung und die Verwertung von Forschungsergebnissen zielen.

- Aufbau eines **Applikationslabors zur Bearbeitung von Pilotprojekten**. Ergebnisse des FBH sollen hier zu anwendungsnahen Demonstratoren weiterentwickelt werden.
- Ausbau der FuE-Aktivitäten im Wachstumskern **Berlin WideBaSe**, die am FBH koordiniert werden, auf dem Gebiet der Halbleiter großer Bandlücke. Im März 2012 präsentierten die Partner erste Ergebnisse auf der Messe Laser Optics Berlin.
- Im Rahmen von **MedUSE** sollen mit Unterstützung einer Verwertungsagentur neue Anwendungsfelder für Forschungsergebnisse des FBH in Medizintechnik, Umwelttechnik und Sensorik erschlossen werden. Dafür wurden Technologieofferten entwickelt und gezielt Unternehmen angesprochen.
- 2012 begann die Abteilung Wissenschaftsmanagement mit der **systematischen Reklamationsbearbeitung** bei der Beschaffung von Anlagen und Geräten. Das Team unterstützt im Falle von Lieferproblemen und nicht akzeptablen Lieferungen.

## FIT FOR THE FUTURE: TRAINING & EDUCATION FOR SKILLED PERSONNEL

One of the main issues the education and training group had to deal with in 2012 was the lack of skilled personnel. Apart from demographic change and a decreasing number of school leavers, the group had to face an additional challenge: Many training possibilities in optics and microsystems technology are still fairly unknown or seem to be unattractive to young people, and especially girls. Thus, the overall objective was to "advertise" training and job opportunities in science, technology, engineering and mathematics (STEM) in general and in microsystems technology in particular.

To attract young people for a career in this field, a mix of different actions was taken. Information was spread, for example, by participating in fairs and exhibitions and organizing job orientation workshops in schools and at institutes, addressing pupils as well as teachers and multipliers. The Laser Optics Berlin fair, which takes place every two years, offers a special careers day for pupils and students. ANH Berlin had a stand to inform about job opportunities in high technologies. In cooperation with two other companies, FBH held a special session presenting training and career prospects in microtechnology and optics.



▲ Student measuring the characteristic line of a photovoltaic cell at Lise-Meitner-Schule.

Not only potential apprentices and students need encouragement, but also companies require assistance to promote initial vocational and further training. Based on the long-lasting and sound cooperation between FBH and the vocational school Lise-Meitner-Schule, the training network ANH Berlin (Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin) has been supporting companies and institutes comprehensively in training matters, for instance by publishing vacancies, recruiting appropriate candidates, and initiating training associations for small companies. In addition to that, ANH Berlin has developed training modules in vacuum technology and photovoltaics as well as a scheme to acknowledge achievements from vocational training for academic education.

▲▼ ANH Berlin's special session at Laser Optics Berlin 2012 presenting training and job opportunities in microtechnology and optics.



With that, ANH Berlin aims at making training more attractive and to open pathways between different educational levels.

For many years, FBH has been putting special emphasis on addressing girls to opt for a career in natural sciences as their proportion in STEM still remains fairly low. In view of that fact, the third girls' technology congress in December 2012, again initiated and organized by FBH, has been a great success. 240 schoolgirls from 7<sup>th</sup> to 12<sup>th</sup> grade from the Berlin-Brandenburg region tested their own technical talents and received a lot of information about training opportunities in vocational education and training (VET) and at universities. Staff from FBH supported the congress also by sending female scientists and technicians as role models. Thus, girls had the chance to get in contact with women, who work in the field of high technologies. The congress is linked to the nationwide network *mst|femNet* meets Nano and Optics bringing together representatives from public administration, politics, industry, research and education.



▲ Opening ceremony at the third girls' technology congress.

To improve training and job prospects in high technology an exchange of know-how and experiences is crucial. That's why the network has been expanded consistently on local, regional, national and EU-level. In 2012, the Leonardo da Vinci partnership project "bottle neck" with partners from Belgium, Denmark, Finland, UK and Germany has been completed successfully. Several efforts have already been made to continue the transnational cooperation and to stimulate transfer of good practice. In academic careers, working and living abroad is rather common, whereas it is quite exceptional in VET. It is therefore even more encouraging that, as one result of the project, one apprentice from FBH passed a 12-week work placement at IMEC. IMEC in Leuven, Belgium, was one of the partners in the "bottle neck" consortium. The trainee thus benefited not only from gaining a lot of professional skills, but also considerable personal experiences and key competences.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Ein wichtiger Schwerpunkt der Bildungsaktivitäten im Jahr 2012 war die Nachwuchsgewinnung. Vor allem im naturwissenschaftlich-technischen Bereich sind zahlreiche Berufe weitgehend unbekannt. Das am FBH angesiedelte Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie – ANH Berlin hat sowohl Unternehmen in allen Fragen der beruflichen Bildung unterstützt als auch Schülerinnen und Schüler, Lehrkräfte und Eltern zu Berufen und Karrieremöglichkeiten in der Hochtechnologie beraten. Darüber hinaus entwickelte ANH Berlin Zusatzqualifikationen für die Photovoltaik und die Vakuumtechnik. Um die Durchlässigkeit zwischen Berufsausbildung und Studium zu erhöhen, hat das Netzwerk auch ein Verfahren zur Anrechnung von Ausbildungsinhalten für den Bachelor Mikrosystemtechnik / Optische Technologien erarbeitet. Mehr Mädchen für eine Ausbildung oder ein Studium im MINT-Bereich zu gewinnen war ein weiteres Ziel. Dieses verfolgte der vom FBH organisierte 3. Mädchen-Technik-Kongress im Dezember 2012 mit großem Erfolg: Mehr als 240 Teilnehmerinnen begeisterten sich für das breite Informationsangebot und die praktischen Experimente. Das Projekt „bottle neck“, das den internationalen Austausch in der Hochtechnologie-Ausbildung im Rahmen des EU-Programms Leonardo da Vinci förderte, wurde 2012 erfolgreich abgeschlossen. Im Ergebnis konnte u.a. ein Azubi des FBH die im Rahmen des Netzwerks neu entstandenen Kontakte für ein 12-wöchiges Praktikum bei IMEC in Leuven/Belgien nutzen.

# IMPRINT | IMPRESSUM

Ferdinand-Braun-Institut  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik  
Gustav-Kirchhoff-Straße 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)

**Editors**  
**Redaktion**

Gisela Gurr,  
Petra Immerz

**Images & Graphics**  
**Fotos & Grafiken**

D. Ausserhofer: p. 47  
S. Auster: p. 40  
Messe Berlin: p. 39  
M. Schönenberger: p. 3  
B. Schurian: pp. 8, 12, 22, 27, 28, 42, 52 (top),  
78, 82 (top), 100 (bottom), 104  
M. Wodrich: p. 45 (top)  
further / weitere: FBH

**Layout & Typesetting**  
**Layout & Satz**

Andrea Jaschinski,  
vitamin-a-design

**Printing**  
**Druck**

Laserline Druckzentrum,  
Berlin

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 2013



**Leibniz**  
Ferdinand-Braun-Institut

Ferdinand-Braun-Institut  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik  
Gustav-Kirchhoff-Straße 4  
12489 Berlin, Germany

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