

ANNUAL REPORT // JAHRESBERICHT

2009



**Leibniz**  
Ferdinand-Braun-Institut

Bei der Realisierung und beim Einsatz von III/V-Halbleiterkomponenten steht das Ferdinand-Braun-Institut seit vielen Jahren für die enge Zusammenarbeit mit Partnern in Forschung und Industrie. Vor allem die strategischen Partnerschaften haben sich nachhaltig bewährt. So ist es uns trotz der allgemein turbulenten Wirtschaftslage gelungen, die laufenden Industriekooperationen stabil zu halten und weitere Projekte auf den Weg zu bringen. Dabei half die Positionierung des FBH im Bereich der Spitzenforschung für Spezial- und Nischenmärkte. Diese zeigten sich von der Gesamt-Wirtschaftslage weitgehend unbeeinflusst, was sich wiederum positiv auf die Bilanz unserer Ausgründungen und so manches Industriepartners auswirkte – einige konnten entgegen dem Gesamt-trend schwarze Zahlen schreiben oder mussten allenfalls leichte Umsatzrückgänge verbuchen.

Auch technologische Neuentwicklungen, die die Zukunftsfähigkeit des FBH sichern, sind uns im vergangenen Jahr gelungen. Die aktuellen Ergebnisse aus dem Bereich der hybriden Diodenlasersysteme etwa versprechen vielfältige Einsatzmöglichkeiten. So haben wir eine neuartige Pikosekunden-Pulslichtquelle mit integrierter Elektronik erfolgreich demonstriert. Damit können einzelne Pulse aus den hochfrequenten Impulsfolgen eines KurzpulsLasers "herausgepickt" werden. Solche Lasersysteme können unter anderem als Seedlaser in der Lasermaterialbearbeitung eingesetzt werden. Auf der gleichen Technologie basieren kompakte Laserstrahlquellen mit extrem schmaler Linienbreite und gleichzeitig

The Ferdinand-Braun-Institut is renowned for realizing and applying III-V semiconductor components in close cooperation with partners in research and industry since many years. Especially strategic partnerships turned out to be sustainably successful. Despite the turbulent global economic situation, we accomplished to keep industrial cooperations stable and get new projects off the ground. FBH's positioning in cutting-edge research for special and niche markets turned out favorable, since this field appeared to be almost unimpressed by the economic overall situation. This, in turn, positively affected the balance sheets of our spin-offs and some of our industrial partners – quite a few of them managed to operate in the black or, at best, had to record a slight drop in turnover.

We also succeeded in developing new technological advancements assuring future viability of the FBH. Latest results in the field of hybrid diode laser systems for instance open up multifaceted applications. One of these developments is a novel pulse picker technology that allows us to pick out single pulses from the high-frequency pulse chain generated by a mode-locked semiconductor laser. Laser systems with pulse pickers can be used for example in laser material processing as seed lasers for fiber lasers. FBH's compact diode lasers providing both an extremely narrow linewidth and high output power base on the same technology. Such lasers are essential to obtain superior resolution of spectrographs which is necessary for high-precision measurements; they are



hoher Ausgangsleistung. Solche Laser sind Voraussetzung für die erforderliche hohe Auflösung von Spektrographen für Messungen höchster Präzision; auch für die hochgenaue Synchronisation von Atomuhren werden sie benötigt. Für Laserdisplays, wie sie etwa in Planetarien und Flugsimulatoren eingesetzt werden, wurde zudem ein Laboraufbau auf die Größe einer Streichholzschachtel miniaturisiert. Die Module liefern hochbrillante Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich mit hohen Ausgangsleistungen.

Auch im Bereich der Mikrowellentechnik und Galliumnitrid-Leistungselektronik haben wir wichtige Fortschritte erreicht. Ein Beispiel sind energieeffiziente Galliumnitrid-Switchmodeverstärker für die kommende Mobilfunkgeneration. Für deren höhere Bandbreiten mit neuen spektrumseffizienteren Modulationsverfahren werden dringend verbesserte Verstärkerarchitekturen benötigt, da Mikrowellen-Leistungsverstärker den Hauptteil am Energieverbrauch von Basisstationen ausmachen. Unseren Wissenschaftlern ist es gelungen, derartige Verstärker auf Basis des Klasse-S-Konzeptes zu entwickeln, bei denen digitale Signale verstärkt und erst direkt am Ausgang wieder in ein analoges Signal gewandelt werden. Effizienzen von bis zu 100 Prozent sind damit theoretisch möglich. 60% Effizienz bei Volllastleistung konnten wir im Klasse-D-Betrieb bei 19 Watt bereits erreichen.

Bei den Forschungs Kooperationen hat das Ferdinand-Braun-Institut sein Kooperationsmodell mit Universitäten inzwischen überregional erweitert. So zielt eine gemeinsame Stiftungsprofessur mit dem Oerlikon-Konzern und der Goethe-Universität Frankfurt am Main auf die stärkere Vernetzung zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung. Durch den engen Austausch sollen schneller Ergebnisse erzielt und in Anwendungen überführt werden. Die Professur wurde mit Viktor Krozer von der Technischen Universität Dänemark (DTU) besetzt, der am FBH zugleich den Bereich Terahertz-Elektronik etablieren wird. Der Aufbau dieser Gruppe läuft bereits. Damit ist zu den drei bereits existierenden Forschungs Kooperationen mit Berliner Universitäten die erste überregionale hinzugekommen.

additionally required for the highly precise synchronization of atomic clocks. Using our micro-bench technology, a laboratory set-up has been miniaturized to a unit the size of a matchbox. These high-brightness laser modules deliver high output powers in the visible spectral range and can be used in laser displays which are utilized for example in planetariums and flight simulators.

Important progress has also been made in the field of microwave technology and gallium nitride power electronics. Energy-efficient gallium nitride switch-mode amplifiers for next-generation mobile communications providing higher bandwidths with novel spectrum-efficient modulation schemes are only one example. As microwave power amplifiers are the main energy consumers of base stations, improved amplifier architectures are desperately needed. We managed to develop such amplifiers based on the class-S concept, which amplifies digital signals and transforms them into analogue signals not before the antenna. With this approach, a theoretical 100 percent efficiency is possible. In class-D operation at 19 Watt we already succeeded to increase efficiency to 60% at full-scale conduction.

Regarding our research cooperations, we elevated FBH's university cooperation model to a trans-regional level. A joint endowed professorship with the Oerlikon group and the Goethe-Universität Frankfurt aims at closer cross-linking between basic and application-oriented research. Thus, results shall be achieved significantly quicker and transferred into application. Meanwhile, the position has been filled with Viktor Krozer from the Technical University of Denmark (DTU), who began to establish the terahertz electronics field at the FBH in parallel. Currently he is building up the new group. With this additional research cooperation, the first trans-regional added to the three existing Berlin university cooperations.

2009 was also characterized by reconstruction and renovation works within the framework of the public economic stimulus package. Air conditioning in the cleanroom has been updated with respect to improve energy efficiency. We expect significant energy savings

Das Jahr 2009 war zudem geprägt von Umbauten und Erneuerungsarbeiten im Rahmen der öffentlichen Konjunkturprogramme, mit denen die Klimatechnik im Reinraum auf den neuesten Stand hinsichtlich Energieeffizienz gebracht wurde. Wir erwarten uns dadurch deutliche Energieeinsparungen. Auch wichtige Großgeräte wurden installiert wie eine hochmoderne Elektronenstrahl-Belichtungsanlage, ein weiterer Multiwafer-Reaktor für die Gasphasenepitaxie von AlGaIn-Schichten und eine UHV-Facettenpassivierungsanlage, bei der FBH-Know-how großtechnisch umgesetzt wurde. An dieser Stelle danke ich unseren Geldgebern in Land und Bund sehr für die nachhaltige Unterstützung. Solche aufwändigen Investitionen in die Infrastruktur des Instituts sind unabdingbare Voraussetzung für unsere zukünftige Leistungsfähigkeit in Forschung und Technologietransfer. Eine vergleichbare Dynamik würde ich mir bei der Projektförderung wünschen. Auch Ausgaben für Personal und Verbrauch sollten dem investiven Bereich zugeordnet werden, denn Forschungsprojekte wirken nie ausschließlich konsumtiv. Gerade in der Krise sind sie unentbehrliche Investitionen in Köpfe und damit in die Zukunft.

Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die mit ihrem Wissen und permanenten Engagement zum nachhaltigen Erfolg des Ferdinand-Braun-Instituts beitragen. Besonderer Dank gebührt den Kolleginnen und Kollegen, die mit flexibler Mehr- und Samstagsarbeit vor und nach der Umbauphase im Reinraum geholfen haben, die Einschränkungen im Forschungsbetrieb so gering wie möglich zu halten.

Die Entwicklungen des vergangenen Jahres haben wir in komprimierter Form im aktuellen Jahresbericht zusammengefasst. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Ihr



Günther Tränkle

from these measures. Important equipment such as a state-of-the art electron beam system, a further multiwafer reactor for vapor phase epitaxy of AlGaIn layers and an UHV facet passivation system were installed. At this point I like to thank our Federal and State financiers most sincerely for their sustainable support. Such comprehensive investments into the institute's infrastructure are an indispensable precondition for our future capability in research and technology transfer. Comparable dynamics regarding project funding would be highly desirable. Expenses for staff and consumption should be assigned to the investment-related sector since the effect of research projects is never solely restricted to consumption. Particularly in crisis such expenditures are indispensable investments in minds and thus in future.

Last but not least I wish to thank our team members who contribute with their knowledge and permanent involvement to the long-term success of the Ferdinand-Braun-Institut. My special thanks go to the colleagues who helped to minimize restraints in research processes as far as possible by flexible overtime work and extra weekend shifts before and after the renovation period in the cleanroom.

I wish you an inspiring reading of last year's developments compiled in the actual annual report.

Yours sincerely



Günther Tränkle

## INHALTSVERZEICHNIS // TABLE OF CONTENTS

<b>PROFIL PROFILE</b>	<b>7</b>	<b>DIODENLASER DIODE LASERS</b>	<b>67</b>
<b>SCHLAGLICHTER HIGHLIGHTS</b>	<b>19</b>	Effiziente, spektral stabilisierte Hochleistungs-Diodenlaser Efficient High-Power Diode Lasers with Built-In Nano-Structured Gratings	<b>68</b>
<b>GESCHÄFTSBEREICHE &amp; FORSCHUNG BUSINESS AREAS &amp; RESEARCH</b>	<b>37</b>	Untersuchungen von Breitstreifenlasern im Hochleistungsbereich Investigation of BA Lasers at the Power Limits	<b>70</b>
<b>MIKROWELLENKOMponentEN UND -SYSTEME MICROWAVE COMPONENTS AND SYSTEMS</b>	<b>39</b>	Kompakte Module für Laserstrahlung hoher Leistung Compact High-Power Laser Modules	<b>73</b>
Klasse-S-Schaltverstärkerkonzept für HF-Leistungsmodule Class-S Amplifier Concept for RF Power Modules	<b>40</b>	Rot emittierende Laserstrahlquellen mit hoher Leuchtdichte Red Emitting Laser Light Sources with High Luminance	<b>75</b>
Robuste rauscharme Verstärker mit kurzer Erholungszeit Highly Robust Low-Noise Amplifiers Providing Fast Recovery	<b>43</b>	Mikrosystem-Laserstrahlquellen für die Materialanalytik Micro-System Light Sources for Chemical Analysis of Materials	<b>77</b>
77 GHz SiGe-Receiver für KFZ-Radar 77 GHz SiGe Receiver for Automotive Radar	<b>45</b>	Diodenlaser geringer Linienbreite für optische Kommunikation und Messtechnik Narrow Linewidth Diode Lasers for Optical Communications and Measurement	<b>80</b>
Plasmaquellen für medizinische Anwendungen Plasma Sources for Medical Applications	<b>47</b>	Mikrobank zur Erzeugung kurzer optischer Pulse Microbench for Ultra-Short Pulse Generation	<b>82</b>
<b>GAN-ELEKTRONIK GAN ELECTRONICS</b>	<b>53</b>	<b>GAN-OPTOELEKTRONIK GAN OPTOELECTRONICS</b>	<b>87</b>
Verbesserte Linearität von GaN-HFETs durch optimierte epitaktische Struktur Linearity Improvement of GaN HFETs by Epitaxial Design Optimization	<b>54</b>	Wasserdesinfektion mit GaN-basierten UV-LEDs Water Disinfection with GaN-Based UV LEDs	<b>88</b>
Qualifizierung von GaN-HEMT-Epi-Wafern Benchmarking of GaN HEMT Epi Wafers	<b>56</b>	Erhöhte Lichtextraktion in UV-LEDs mit Nanopixel-Kontakten Enhanced Light Extraction in UV LEDs Using Nanopixel Contacts	<b>90</b>
Selbstsperrende GaN-Transistoren für Leistungsschalter Normally-Off GaN Transistors for Power Switching Applications	<b>58</b>	Rippenwellenleiter-Diodenlaser auf der Basis von GaN (0001) Ridge Waveguide Diode Lasers Based on GaN (0001)	<b>92</b>
Erhöhung der Durchbruchspannung in GaN-basierten HEMTs BreakdownVoltage Enhancement in GaN-Based HEMTs	<b>60</b>	Laserdioden auf nicht-polarem und semipolarem GaN Laser Diodes on Nonpolar and Semipolar GaN	<b>95</b>
Thermisch optimierte 2D-Skalierung von GaN-Leistungstransistoren Thermal Optimization by 2D Scaling of GaN Power Transistors	<b>62</b>	<b>MATERIALIEN UND PROZESSE MATERIALS AND PROCESSES</b>	<b>99</b>
		Einkristalline Superspiegel Single Crystal Super Mirrors	<b>100</b>
		Versetzungssreduzierte GaN- und AlGaIn-Schichten durch HVPE Reduced Dislocation Density of GaN and AlGaIn Layers by HVPE	<b>102</b>
		Pendeo-Epitaxie von (Al,Ga)N für UV-Emitter Pendeo Epitaxy of (Al,Ga)N for UV Emitting Devices	<b>104</b>
		Kohlenstoff-Dotierung von GaN für hochspannungsfeste AlGaIn-GaN-HFETs Carbon Doping of GaN for High-Voltage AlGaIn-GaN HFETs	<b>106</b>
		UV-Photodetektoren auf der Basis von Siliziumcarbid (SiC) Silicon Carbide (SiC)-Based UV Photo Detectors	<b>108</b>
		<b>WISSENSCHAFTSMANAGEMENT SCIENCE MANAGEMENT</b>	<b>113</b>
		Strategische Kooperationen & Netzwerke Strategic Cooperations & Networks	<b>114</b>
		Forschung profitiert vom Technologietransfer Research Profits from Technology Transfer	<b>115</b>
		Bildungsmanagement – erfolgreiche Netzwerkstrukturen Education and Training Management – Successful Network Structures	<b>118</b>

**PROFIL  
PROFILE**

## DAS FBH IM PROFIL

Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsweldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das FBH 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, beispielsweise 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 Hoechstfrequenztechnik (FBH) researches electronic and optical components, modules and systems based on compound semiconductors. These devices are key enablers, that address the needs of today's society in fields like communications, energy, health and mobility. Specifically, FBH develops light sources from the visible to the ultra-violet spectral range: high-power diode lasers with excellent beam quality, UV light sources, and hybrid laser systems. Applications range from medical technology, high-precision metrology and sensors to optical communications in space. In the field of microwaves, FBH develops high-efficiency multi-functional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources that operate with economic low-voltage drivers are fabricated for use in a variety of applications, such as for the treatment of skin diseases.

The FBH is a competence center for III-V compound semiconductors with 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 competence 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 Höchsthochfrequenztechnik. 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 und attraktives Arbeitsumfeld mit reizvollen Aufgabenstellungen und Entfaltungsmöglichkeiten. Unsere Zukunft sichern wir durch die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und technischer Fachkräfte. Wir haben es uns zur Aufgabe gemacht, den Anteil weiblicher Fach- und Führungskräfte im technischen und naturwissenschaftlichen Bereich gezielt zu erhöhen.

## 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 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.



## GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG

### Mikrowellenkomponenten & -systeme

- Frontends bis 100 GHz
- Leistungsverstärker bis 10 GHz
- Low-Noise-Komponenten
- Mikrowellen-Plasmaquellen
- Terahertz-Elektronik

### GaN-Elektronik

- Mikrowellentransistoren & MMICs
- Leistungselektronik

### Diodelaser

- Breitstreifen & Barren (Spektralbereich 0,6 - 1,2  $\mu\text{m}$ )
- Hochbrillante Laser (Linienbreiten < 10 MHz)
- Hybride Lasersysteme
- Lasersensorik
- Lasermetrologie

### GaN-Optoelektronik

- UV-Hochleistungslaserdioden
- Blaue & grüne Laserdioden
- UV-LEDs

### Material- & Prozesstechnologie

- GaN-HVPE
- Optische Sonderbauelemente
- In-situ Kontrolltechniken bei MOVPE & HVPE
- Lasermikrostrukturierung

### Wissenschaftsmanagement

- Technologietransfer & Marketing
- Bildungsmanagement

## 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

### 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 (line width < 10 MHz)
- Hybrid laser systems
- Laser sensors
- Laser metrology

### GaN Optoelectronics

- UV high-power laser diodes
- Blue & green laser diodes
- UV LEDs

### 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

## 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

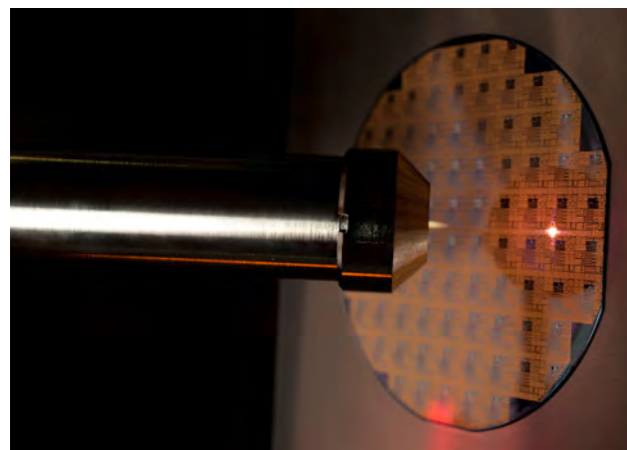
- Galliumnitridelektronik: Transistoren und Verstärker (hybrid, MMIC) – Entwurf, Fertigung, Kleinserie
- Mikrowellenplasmen
- Elektromagnetische Simulation
- Hochfrequenz- und Leistungsmesstechnik

### Hochleistungsdiodenlaser und LEDs

- Diodenlaser auf Galliumarsenid-Basis mit maßgeschneiderten Eigenschaften (Leistung, Wellenlänge, Linienbreite, Strahlgröße, 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



## 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

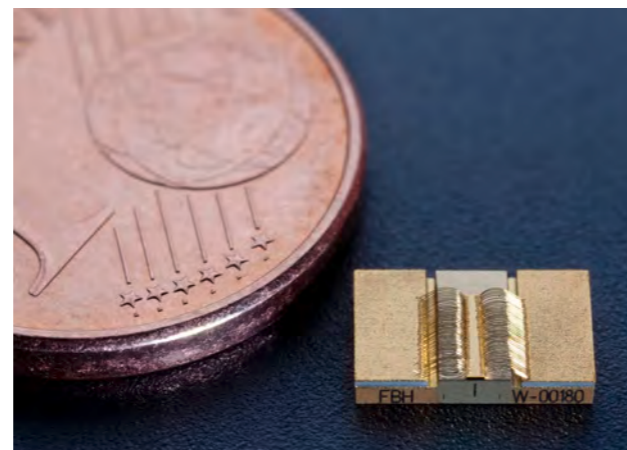
- Gallium nitride electronics: transistors and amplifiers (hybrid, MMIC) – design, production, small-scale series
- Microwave plasmas
- Electromagnetic simulation
- Microwave measurement and device characterization

### 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



## KONTAKT // CONTACT

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 <http://www.fbh-berlin.de>

<b>Direktor Director</b>	Prof. Dr. rer. nat. Günther Tränkle Phone +49.30.6392-2601 guenther.traenkle@fbh-berlin.de
<b>Stellvertretender Direktor Associate Director</b>	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich Phone +49.30.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
<b>Optoelektronik / Diodenlaser Optoelectronics / Diode Lasers</b>	Dr. rer. nat. Götz Erbert Phone +49.30. 6392-2656 goetz.erbart@fbh-berlin.de
<b>Mikrowellentechnik / Mikrowellenkomponenten &amp; -systeme Microwaves / Microwave Components &amp; Systems</b>	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich Phone +49.30.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
<b>GaN-Optoelektronik GaN Optoelectronics</b>	Prof. Dr. rer. nat. Michael Kneissl Phone +49.30.6392-2816 michael.kneissl@fbh-berlin.de
<b>GaN-Elektronik GaN Electronics</b>	Dr.-Ing. Joachim Würfl Phone +49.30.6392-2690 joachim.wuerfl@fbh-berlin.de
<b>Prozesstechnologie Process Technology</b>	Dr. rer. nat. Olaf Krüger Phone +49.30.6392-3205 olaf.krueger@fbh-berlin.de
<b>Materialtechnologie Materials Technology</b>	PD Dr. rer. nat. Markus Weyers Phone +49.30.6392-2670 markus.weyers@fbh-berlin.de
<b>Wissenschaftsmanagement Science Management</b>	Nicolas Hübener, M. Sc., Dipl. Kfm. (FH) Phone +49.30.6392-3396 nicolas.huebener@fbh-berlin.de
<b>Kommunikation Communications &amp; Marketing</b>	Petra Immerz, M.A. Phone +49.30.6392-2626 petra.immerz@fbh-berlin.de





# Forschungsvorbund Berlin e.V.

## DER FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V.

Der Forschungsvorbund 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 (Geschäftsführer: Dr. Falk Fabich) und gehören zur Leibniz-Gemeinschaft.

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

Forschungsvorbund Berlin e.V.  
Rudower Chaussee 17  
12489 Berlin  
Tel. +49.30.6392-3330  
Fax +49.30.6392-3333  
E-Mail fabich@fv-berlin.de  
Web www.fv-berlin.de

## THE FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V.

The Forschungsvorbund Berlin e.V. comprises eight research institutes in Berlin – one of them being the Ferdinand-Braun-Institut. The institutes are active in the fields of natural sciences, life sciences and environmental sciences. They pursue common interests within the framework of a single legal entity while preserving their scientific autonomy. As research institutes of national scientific importance, they are jointly funded by the German federal and state governments. The institutes share an administrative infrastructure (Common Administration, Head: Dr. 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.

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

## DAS INSTITUT IN ZAHLEN

Gegründet 1992

## THE INSTITUTE IN FIGURES

Founded 1992

### 2008

#### Mitarbeiter

– 235 (inklusive 95 Wissenschaftler und 35 studentische Hilfskräfte)

#### Staff

– 235 (including 95 scientists and 35 student assistants)

#### Umsatz

– Grundfinanzierung durch das Land Berlin und den Bund (10,9 Mio. Euro)  
– Öffentliche Drittmittel (5,9 Mio. Euro)  
– Industrielle Auftragsforschung (3,2 Mio. Euro)

#### Budget

– Basic funding: State of Berlin & Federal Government (10.9 Mio. Euro)  
– Public project funding (5.9 Mio. Euro)  
– Industrial contracts (3.2 Mio. Euro)

### 2009

#### Mitarbeiter

– 230 (inklusive 100 Wissenschaftler und 20 studentische Hilfskräfte)

#### Staff

– 230 (including 100 scientists and 20 student assistants)

#### Umsatz

– Grundfinanzierung durch das Land Berlin und den Bund (11,5 Mio. Euro)  
– Öffentliche Drittmittel (6,5 Mio. Euro)  
– Industrielle Auftragsforschung (2,8 Mio. Euro)

#### Budget

– Basic funding: State of Berlin & Federal Government (11.5 Mio. Euro)  
– Public project funding (6.5 Mio. Euro)  
– Industrial contracts (2.8 Mio. Euro)

## ORGANIGRAMM // ORGANIZATIONAL CHART

### Geschäftsbereiche // Business Areas

<b>Board of Trustees of Forschungsverbund Berlin e.V.</b> Chairwoman Dr. Jutta Koch-Unterseher, SenBWF Berlin				
<b>Administrative Management</b> Dr. Falk Fabich Managing Director of FV Berlin		<b>Scientific Director</b> Prof. Dr. Günther Tränkle Director of the FBH		
<b>Business Areas</b>				<b>Departments</b>
<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	Microwave Technology
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	High-Power Laser Diodes Blue & Green Laser Diodes UV LEDs	Optoelectronics Materials Technology Process Technology Science Management Central Service Units
<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. A. Peters - Optical Metrology (HU Berlin)				
Prof. Dr. V. Krozer - Terahertz Photonics (Uni Frankfurt)				

### Abteilungen // Departments

<b>Board of Trustees of Forschungsverbund Berlin e.V.</b> Chairwoman Dr. Jutta Koch-Unterseher, SenBWF Berlin					
<b>Scientific Director</b> Prof. Dr. Günther Tränkle Director of the FBH				<b>Administrative Management</b> Dr. Falk Fabich Managing Director of FV Berlin	
<b>Business Areas</b>	<b>Departments</b>				
<b>Microwave Components &amp; Systems</b>	<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	<b>Science Management</b> N. Hübener, M.Sc.
<b>GaN Electronics</b>	Electromagnetic Simulation	Laser Design	Arsenides & Phosphides	Frontend	Strategy
<b>Diode Lasers</b>	Circuit Design	Laser Technology	Nitrides	Backend	Technology Transfer & Marketing
<b>GaN Optoelectronics</b>	Measurements & Packaging	Mounting & Packaging	Education of Microtechnologists		Education & Training Management
<b>Central Service Units</b> Corporate Communications / Quality Management / Administration / IT Support / Technical Services					

## WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT // SCIENTIFIC BOARD

### Vorsitz // Chair

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

### Mitglieder // Members

<b>Dipl.-Ing. Bernd Adelseck</b>	EADS Deutschland GmbH, Ulm
<b>Dr. Frank van den Bogaart</b>	TNO Defence, Security and Safety, The Hague (NL)
<b>Prof. Dr. Christian Boit</b>	Technische Universität Berlin, Berlin
<b>Prof. Dr. Claire Gmachl</b>	Princeton University, Princeton (USA)
<b>Dr. Hans-Jürgen Kahlert</b> (until 21 January 2009)	Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Jena
<b>Dr. Ulf Meiners</b> (from 1 April 2009)	United Monolithic Semiconductors GmbH, Ulm
<b>Dr. Gerhard Packeiser</b> (until 31 March 2009)	Infineon Technologies AG, München
<b>Prof. Dr. Reinhart Poprawe M.A.</b>	Fraunhofer-ILT, Aachen
<b>Prof. Dr. Herbert Reichl</b> (until 31 March 2009)	Fraunhofer-IZM, Berlin
<b>Berry Smutny</b> (from 1 April 2009)	OHB-System AG, Bremen
<b>Dr. Uwe Strauss</b>	OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg
<b>Dr. Theodor Wiesmann</b> (until 31 March 2009)	Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang

# SCHLAGLICHTER HIGHLIGHTS

## FERDINAND-BRAUN-INSTITUT: FÜHREND BEI DIODENLASERN

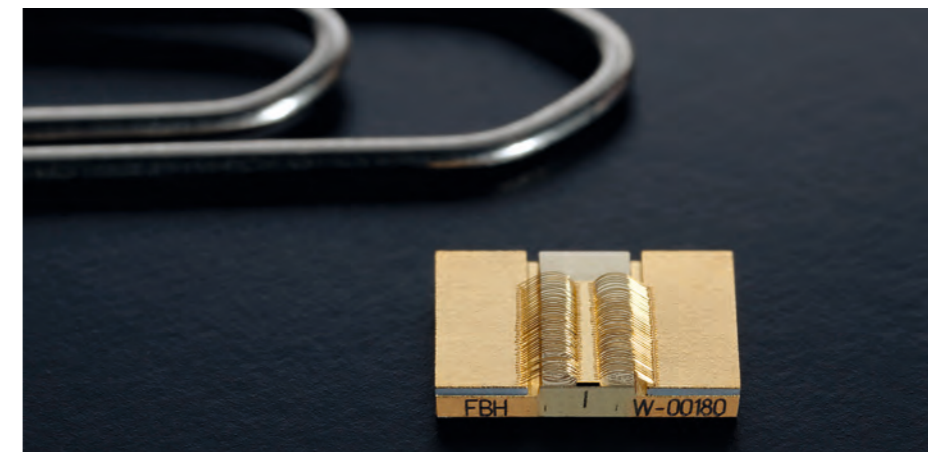
Auch im vergangenen Jahr hat das FBH seine Leistungsfähigkeit als eines der weltweit führenden Institute in der Lasertechnologie unter Beweis gestellt. So ist es am FBH gelungen, Mikromodule mit 1 Watt Lichtleistung im grünen und blauen Spektralbereich zu entwickeln. Solche hybrid aufgebauten Strahlquellen sind für Anwendungen u.a. in der Displaytechnologie oder der Medizintechnik geeignet. Mit einer Größe von weniger als 15 cm<sup>3</sup> sind die Strahlquellen überaus kompakt und bieten dank einer relativ einfachen Ansteuerung einen zusätzlichen Vorteil. Die Mikromodule können bei aufwändigen Großprojektionen, beispielsweise in Planetarien oder Flugsimulatoren, eingesetzt werden. Diese nutzen Laserprojektoren, die gestochen scharfe Bilder liefern auch wenn auf eine Kugel oder eine unebene Fläche projiziert wird. Die kompakten, streichholzschachtelgroßen FBH-Module könnten die derzeit genutzten schrankgroßen Lasertypen ersetzen; die Projektoren würden damit deutlich kleiner und könnten perspektivisch auch im heimischen Wohnzimmer zum Einsatz kommen.

Auch bei den leistungsstarken Einzelemittlern hat das FBH weltweit beachtete Fortschritte erzielt. Spektral stabilisierte Breitstreifenlaser bei einer Wellenlänge von 975 Nanometern bieten schmale Spektren von weniger als einem Nanometer (nm) und eine hohe Konversionseffizienz von bis zu 58%. Der Anteil an elektrischer Energie, der in Licht umgewandelt wird, liegt damit nur knapp unter dem konventioneller Hochleistungsdiodelaser, die jedoch typischerweise eine deutlich größere spektrale Breite von 2 bis 3 nm haben. Mit optischen Leistungen von mehr als 10 Watt liefern die FBH-Laser internationale Rekordwerte hinsichtlich Effizienz und Leistung – die optische Leistung konnte mehr als verdoppelt werden. Damit können die stabilisierten Breitstreifenlaser als besonders effiziente Pump Laser für Faser- und Festkörperlaser in der Materialbearbeitung genutzt werden.

## FERDINAND-BRAUN-INSTITUT: LEADING IN THE FIELD OF DIODE LASERS

Once again, last year's achievements confirmed FBH's reputation as one of the world-wide leading institutes in laser technology. The FBH successfully developed micro modules with 1 Watt output power in the green and blue spectral range. Such hybrid-assembled beam sources are suitable for applications in for example display technology and medical technology. With a size of less than 15 cm<sup>3</sup> the light sources are compact. Additionally, they are relatively simple to control. Such micro modules are suitable for complex large-screen projections, as used in planetariums and flight simulators. Laser projectors deliver ultra-sharp images even when they are projected onto ball-shaped or uneven surfaces. The compact FBH modules are as small as matchboxes and can be used to replace conventional lasers that are as large as a wardrobe. Thus, projectors would become significantly smaller and would be an attractive option for home use in the future.

FBH's progress in high-power single emitters attracted world-wide attention. The institute successfully developed spectrally stabilized broad-area lasers at 975 nanometer wavelength offering a narrow spectrum of less than one nanometer (nm) and a high conversion efficiency of up to 58% at the same time. The percentage of electrical energy transformed into light is only scarcely below those of conventional high-power diode lasers, that typically operate with a significantly wider spectral linewidth of 2 to 3 nm. With optical output powers of more than 10 Watt, FBH lasers achieved international record values with regard to efficiency and power – the optical power is more than doubled compared to previous published results. Hence, the stabilized broad area lasers can be used as efficient pump lasers for fiber and solid-state lasers in materials processing.



Effizient und leistungsstark: Diodenlaser mit schmalen Spektrum.  
Efficient and powerful: diode lasers with narrow linewidth.

Bei der Entwicklung von spektral schmalbandigen Diodenlasersystemen mittlerer Ausgangsleistung haben die Arbeiten am FBH zu einem Durchbruch geführt. Solche Laserstrahlquellen mit extrem geringer Linienbreite werden für Zeitmessungen und Messungen von Naturkonstanten mit extrem hoher Präzision benötigt. Erstmals konnten hybrid integrierte DBR-RW-Diodenlaser bei Ausgangsleistungen oberhalb von 100 mW mit intrinsischen Linienbreiten von unter 20 kHz (auf Zeitskalen von 100  $\mu$ s) demonstriert werden. Dies sind die weltweit geringsten Linienbreiten für nicht aktiv stabilisierte Diodenlaser bei dieser Ausgangsleistung.

## WICHTIGES ETAPPENZIEL ERREICHT: INGAN-CW-LASER

Erstmals ist es dem Ferdinand-Braun-Institut gelungen, lateral monomodige Rippenwellenleiterlaser auf der Basis von Indium-Galliumnitrid (InGaN) zu realisieren, die kontinuierlich 50 mW aussenden. Dieser cw-Betrieb ist eine wichtige Voraussetzung für die angestrebten hohen Leistungen und die schwieriger zu realisierenden, langwelligeren blauen Laser. Nachdem dieser Schritt gelungen ist, soll die Wellenlänge schon bald von 400 nm auf 450 nm erweitert werden.

Strahlquellen um 450 nm sollen künftig in Anwendungen wie der Spektroskopie, Displaytechnologie oder Drucktechnik eingesetzt werden. Solche kompakten Laser, die die Wellenlänge direkt emittieren, sind hoch attraktiv, da sie eine einfache und preisgünstige Alternative zu komplexeren Lasertypen darstellen, die diese Wellenlänge beispielsweise mithilfe von Linsen, Mikrooptiken und Kristallen erreichen. Die Herausforderungen für das FBH liegen insbesondere in der Entwicklung wellenlängenstabiler Laserdioden für spektroskopische Anwendungen sowie kurzpulsiger Laserdioden für Anwendungen in der Bioanalytik und Medizintechnik wie beispielsweise der Fluoreszenzspektroskopie.



Fernfeld einer InGaN-Rippenwellenleiterlaserdiode im cw-Betrieb.  
Far-field of a cw InGaN ridge waveguide laser diode.

In addition, the FBH achieved a breakthrough in the performance of diode lasers with extremely narrow spectral lines. Such sources are critical for precision timekeeping applications as well as for measurements of physical constants with extremely high accuracy. For the first time, hybrid-integrated DBR-RW diode lasers with output powers above 100 mW with intrinsic linewidths below 20 kHz (on time scales of 100  $\mu$ s) were successfully demonstrated. This is the first time world-wide that such narrow lines at such high powers have been delivered from a diode laser without the need for active stabilization.

## IMPORTANT MILESTONE ACHIEVED: INGAN CW LASERS

Within the past year, the Ferdinand-Braun-Institut has for the first time realized laterally single mode ridge waveguide lasers. The indium gallium nitride (InGaN) laser diodes operate continuous-wave (cw) with an output power of 50 mW. CW operation is an important stepping stone towards high power and long wavelength blue laser diodes, whose realization is very challenging. Following this successful step, the emission wavelength will soon be extended from 400 nm to 450 nm.

Future applications for laser sources around 450 nm are, e.g. spectroscopy, laser displays, and printing. Compact direct emitting laser diodes are highly attractive, since they provide a simple and low-cost alternative to complex frequency-doubled laser systems, which require lenses, micro-optics and crystals in order to achieve the desired wavelength. The FBH is specifically targeting the development of wavelength-stabilized laser diodes for spectroscopy applications as well as short-pulse laser diodes for bio analytical and medical applications, like fluorescence spectroscopy.

## HOCHREFLEKTIERENDE SUPERSPIEGEL: BEITRÄGE DES FBH ZUR GRUNDLAGENFORSCHUNG

Laser galten lange als Lösung, die sich das zu lösende Problem erst suchen müssen. Heute sind sie aus der modernen Fertigungstechnik oder Unterhaltungselektronik nicht mehr wegzudenken. Wie der Laser zeigt, sind Anwendungsnähe und Grundlagenforschung kein Gegensatz, denn manch grundlegendes Ergebnis findet seinen Weg in die Applikation. Doch auch anwendungsnahe Forschungseinrichtungen wie das Ferdinand-Braun-Institut beschäftigen sich mit grundlagenorientierten Fragestellungen. Für optische Zeitstandards der nächsten Generation, Experimente zur Quantenphysik oder bei der Detektion von theoretisch vorhergesagten Gravitationswellen spielen optische Resonatoren mit sehr hoher Güte eine wichtige Rolle. Dazu werden Spiegel mit sehr hoher Reflektivität und äußerst geringer Rauigkeit benötigt. Zusätzlich soll das thermische Rauschen noch gering sein – diese Anforderung wird insbesondere durch einkristalline Superspiegel auf der Basis von Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) erfüllt.

Das FBH verfügt über langjährige Erfahrungen beim Wachstum solcher Spiegel unter anderem für oberflächenemittierende Laser. Diese Kompetenz nutzt es für die Herstellung von AlGaAs-Vielschichtspiegeln. Durch selektives Unterätzen entstehen Spiegelmembranen, mit denen Q-Faktoren von  $0,8 \times 10^5$  erreicht wurden. Der mechanische Gütefaktor Q entspricht dabei der Anzahl von Umläufen bis das System abgeklungen ist. Ein hoher Q-Faktor ist erforderlich, um sehr präzise Messungen durchführen zu können. Das FBH arbeitet nun an einer Verbesserung durch mehr Spiegelschichten und an der Optimierung der Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten, um Q-Faktoren oberhalb von  $1 \times 10^5$  zu erreichen. Die Entwicklungsarbeiten stehen hier noch am Anfang und das Ziel ist ehrgeizig, schließlich soll damit einmal das Alter unseres Universums auf die Zehntelsekunde genau ermittelt werden.

## ENERGIEEFFIZIENTE GAN-SWITCHMODE-VERSTÄRKER: KOMPONENTEN FÜR DIE MOBILKOMMUNIKATION DER NÄCHSTEN GENERATION

Weltweit wird intensiv an neuen Verstärkerkonzepten für Mikrowellen-Leistungsverstärker geforscht. Nicht ohne Grund, denn wegen ihrer hohen Energieeffizienz sind sie für Anwendungen gefragt, die derzeit unter dem Schlagwort Green IT diskutiert werden. Informations- und Kommunikationstechnologien, die Umwelt und Ressourcen schonen und gleichzeitig die Betriebskosten senken, sind in Bereichen wie etwa der stetig wachsenden drahtlosen Kommunikation mit immer höheren Datenraten unerlässlich. Zudem fordert die zunehmende

## HIGHLY REFLECTING SUPER MIRRORS: FBH'S CONTRIBUTIONS TO BASIC RESEARCH

For a long time, lasers were considered to be a solution searching for the problem to be solved in the first place. Nowadays, it is hard to imagine modern production lines and also consumer electronics without them. The laser exemplarily shows that application-oriented and basic research are not in contradiction since many basic results find their way into application. Also are application-oriented research institutions like the Ferdinand-Braun-Institut concerned with basic issues. For next-generation optical time standards, experiments in quantum physics and the detection of theoretically predicted gravitational waves, optical resonators with extraordinary high quality play an important role. Therefore, mirrors providing very high reflectivity and an extremely low roughness are required. Thermal noise should be low in addition – a specification which is best met by monocrystalline super mirrors based on aluminum gallium arsenide (AlGaAs).

FBH has long-term experience in the growth of such mirrors like e.g. for surface emitting lasers. The institute uses this competence for the fabrication of AlGaAs multilayers from which mirror membranes are formed by selective underetching thus achieving Q factors of  $0.8 \times 10^5$ . The mechanical quality factor Q corresponds to the number of roundtrips until a systems rings down and a high Q factor is required for high-precision measurements. Thus, the FBH is using more mirror layers and optimizing the interfaces between the layers to achieve Q factors above  $1 \times 10^5$ . The developments are in the early stages and the aim is challenging, but finally one day the age of our universe shall be determined precisely to the tenth of a second.

## ENERGY-EFFICIENT GAN SWITCHMODE AMPLIFIERS: COMPONENTS FOR NEXT-GENERATION MOBILE COMMUNICATIONS

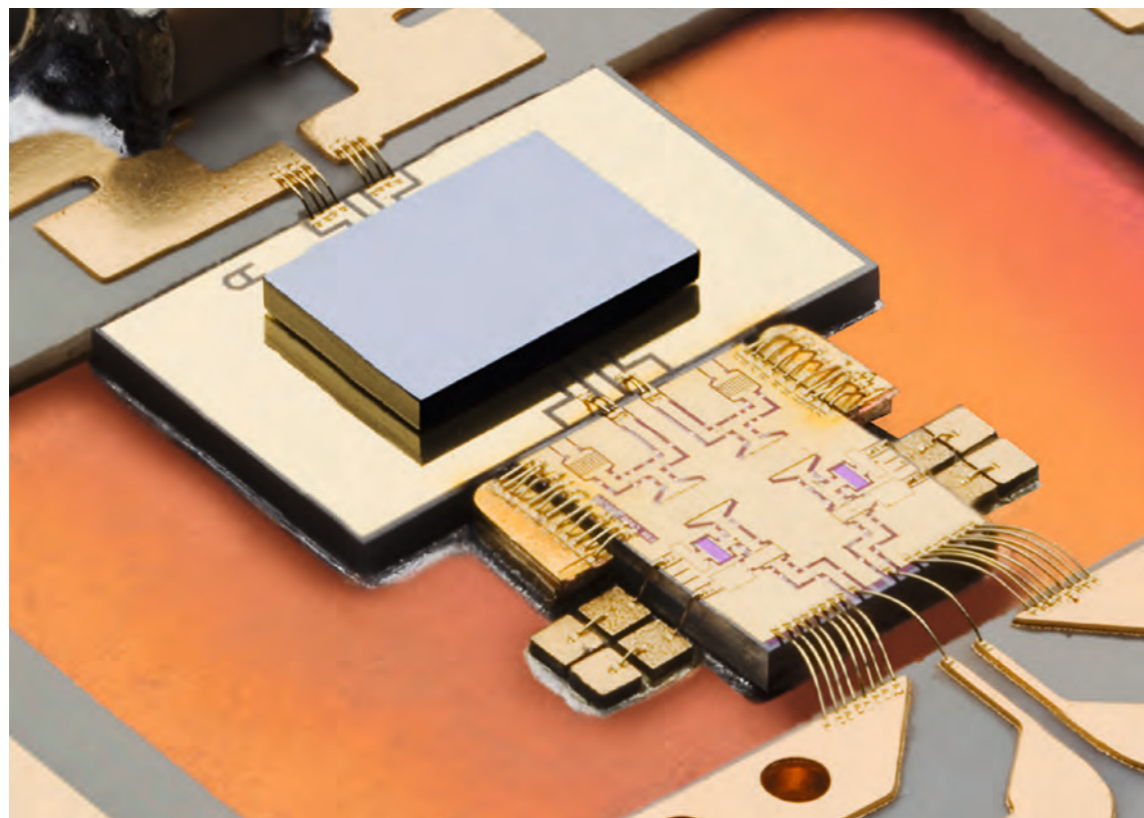
Worldwide, researchers focus on new concepts for energy-efficient microwave power amplifiers. This does not come unexpectedly since such amplifiers are highly demanded for what is commonly referred to as Green IT. Preserving nature and natural resources is a must also for wireless communication networks, even more since energy costs mount up to a considerable part of the expenses for operating the infrastructure. Therefore, developing less power-hungry amplifiers is an essential ingredient for the growing wireless communication market

Digitalisierung der Systeme ihren Tribut und macht auch vor der Hochfrequenz-Endstufe nicht halt. Bei derartigen Leistungsverstärkern hat das Ferdinand-Braun-Institut wichtige Fortschritte erzielt. Dabei wurde auf das Klasse-S-Verstärkerkonzept zurückgegriffen, das digitale Signale verstärkt und erst am Ausgang, also direkt vor der Antenne, wieder als analoges Signal ausgibt. Theoretisch ist damit ein Wirkungsgrad von 100 Prozent möglich, in der Realität liegen die Werte aber bis jetzt noch deutlich darunter. Deshalb ist es entscheidend, die Ursachen für diese Verlustmechanismen zu bestimmen und den Wirkungsgrad zu steigern. Das FBH hat diesen Wert im letzten Jahr auf knapp 60% bei Vollaussteuerung (Klasse-D mit 19 Watt) steigern können.

Verbesserte Verstärkerarchitekturen werden dringend benötigt, denn in der kommenden Mobilfunkgeneration werden höhere Bandbreiten mit neuen spektrumeffizienten Modulationsverfahren zur Verfügung gestellt. Dies reduziert jedoch den Wirkungsgrad der Leistungsverstärker und damit der gesamten Basisstation, denn Mikrowellen-Leistungsverstärker machen den Hauptanteil an deren Energieverbrauch aus. Daher wird der bereits jetzt erhebliche Energieverbrauch der Basisstationen weiter steigen, sofern nicht neue energieeffizientere Verstärkerarchitekturen zum Einsatz kommen.

with ever-increasing data rates. Additionally, the ongoing digitalization of systems takes its toll and does not spare the last analogue stronghold, the high-frequency power amplifier. Consequently, power-amplifier concepts using digital modulation schemes are of particular interest. Important improvements have been achieved at the institute with such power amplifiers. The FBH explores the class S amplifier concept, which amplifies digital signals and transforms them into analogue signals not before the antenna. With this approach, a theoretical 100 percent efficiency is possible, while the values in reality are significantly lower at the moment. It is therefore decisive to identify the different loss mechanisms and to reduce their influence. Within the last year, FBH succeeded in increasing efficiency to almost 60% at full-scale conduction (class D at 19 Watt).

Improved amplifier architectures are desperately needed since the upcoming mobile communication generation will provide higher bandwidths with novel spectrum-efficient modulation schemes. However, the bandwidth improvement comes at the cost of lower efficiency of the power amplifiers and thus of the overall base station as microwave power amplifiers are the main energy consumers. Therefore, the already considerable energy consumption of base stations will further escalate, if not new energy-efficient amplifier architectures are put into operation.



Klasse-S-Demonstrator mit einem 2 mm GaN-Schaltverstärker-MMIC für Mobilfunk-Basisstationen.  
Class S demonstrator with a 2 mm GaN switch-mode amplifier MMIC for mobile communications base stations.

## ROBUSTER, SCHNELLER UND EFFIZIENTER: SELBSTSPERRENDE GAN-TRANSISTOREN MIT BIS ZU 1000 V DURCHBRUCHFESTIGKEIT

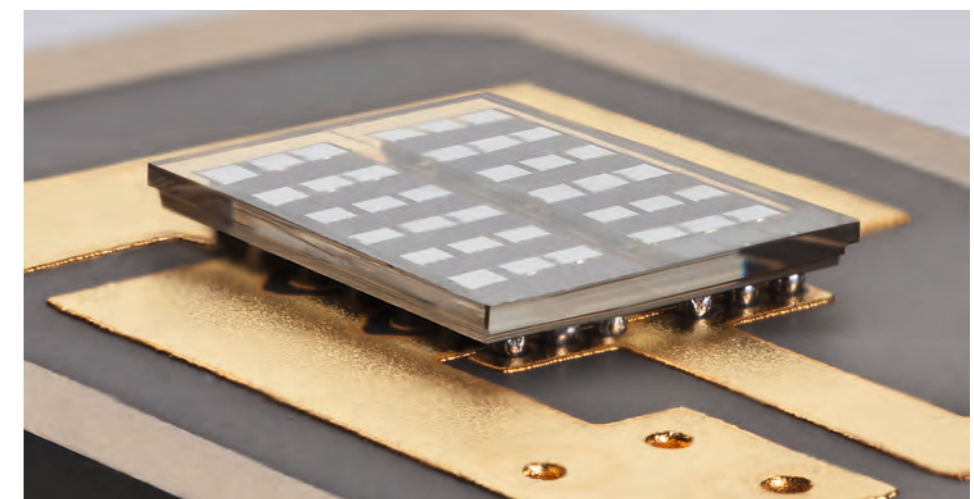
Am FBH ist es gelungen Galliumnitrid (GaN)-Leistungs-transistoren zu entwickeln, die bis zu 1000 Volt Durchbruchfestigkeit bieten. Zusätzlich können sie nur durch das Anlegen einer positiven Steuerspannung von mehr als 1 V geöffnet werden – sie sind selbstsperrend – was aus Sicherheitsgründen eine Voraussetzung für ihren Einsatz in der Leistungselektronik ist. Leistungstransistoren stecken in vielen elektronischen Systemen; sie sind die zentralen Bauelemente in elektrischen Leistungskonvertern, die Gleich- und Wechselstrom umwandeln und auf unterschiedliche Spannungen transformieren können. In Ladegeräten für Mobiltelefone sind sie ebenso zu finden wie in der Motoransteuerung eines ICE.

Aufgrund seiner vorteilhaften Materialeigenschaften bietet sich Galliumnitrid als Halbleitermaterial für die Leistungselektronik an. GaN hat einen höheren Bandabstand und eine höhere Durchbruchfeldstärke als Silizium. GaN-Transistoren können bei einer höheren Temperatur betrieben werden und im Vergleich zu einem gleich großen Siliziumtransistor können größere Spannungen und höhere Ströme geschaltet werden. In der Folge treten weniger Leistungsverluste auf. Darüber hinaus sorgen geringere parasitäre Kapazitäten und bessere elektronische Eigenschaften des Materials für schnellere Schaltgeschwindigkeiten – die Konvertermodule können kleiner werden. Wegen der höheren möglichen Betriebstemperatur sinkt der Kühlaufwand, Gewicht und Baugröße der Leistungskonverter verringern sich weiter. Bei einem Elektroauto beispielsweise bedeutet dies eine deutliche Energieersparnis. Insgesamt haben Leistungskonverter mit GaN-Transistoren einen höheren Wirkungsgrad als jene mit Silizium-Transistoren. Sie sind robuster, schneller und effizienter und daher für die Industrie hoch interessant.

## MORE ROBUST, FASTER AND MORE EFFICIENT: NORMALLY-OFF GAN TRANSISTORS WITH UP TO 1000 V BREAKDOWN STRENGTH

FBH successfully developed gallium nitride (GaN) power transistors offering up to 1000 V breakdown strength. An additional advantage is their normally-off behavior. Due to safety reasons, the transistor can only be opened by applying a positive gate voltage of more than 1 V, which is a precondition for use in power electronics. Power transistors are essential components in many electronic systems. As core devices in electrical power converters they transform direct current and alternating current and shift it to different voltage levels. Power transistors can be found in chargers for cellular phones as well as in the motor control electronics of an Intercity-Express.

Because of its advantageous material properties, the semiconductor gallium nitride offers a higher bandwidth and a higher breakdown strength compared to silicon. GaN transistors can be operated at higher temperatures and higher voltage and current levels than silicon transistors of the same size. Hence, less power losses appear and lower parasitic capacitances and better electronic properties of the material lead to a faster switching speed. Converter modules can thus become smaller. Due to the higher possible operating temperature, cooling efforts scale down, weight and size of the power converters further decrease. For an electrically powered car these properties lead to a significant energy and thus cost reduction. All in all, power converters based on GaN transistors offer a higher efficiency than silicon transistors, they are more robust, faster and more efficient and thus highly attractive for industry.



Flip-Chip-aufgebauter 50 A/200 V GaN-Leistungstransistor.  
Flip-chip mounted 50 A/200 V GaN power transistor.

## WISSENSCHAFTSMANAGEMENT GESTÄRKT: KERNKOMPETENZ TECHNOLOGIETRANSFER WIRD AUSGEBAUT

Seit vielen Jahren verfolgt das FBH eine Reihe strategischer Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen. Der Vernetzung entlang von Wertschöpfungsketten und mit strategischen Partnern kommt eine immer größere Bedeutung zu. Dies wiederum erfordert Personal, das den Forschungsbetrieb unterstützt, etwa beim Projektmanagement oder bei der Kundenakquise und -pflege. Daher wurde Ende 2009 der Geschäftsbereich Netzwerke zur Abteilung Wissenschaftsmanagement umstrukturiert. Das FBH trägt damit der Ausweitung des Technologietransfers im operativen Geschäft sowie den zunehmenden Aufgaben mit institutsstrategischer Bedeutung auch organisatorisch Rechnung. Die Inhalte der neuen Abteilung gliedern sich in drei Säulen: Strategie, Technologietransfer/Marketing und Bildungsmanagement.

## SCIENCE MANAGEMENT STRENGTHENED: CORE COMPETENCE IN TECHNOLOGY TRANSFER BEING FURTHER DEVELOPED

The FBH has been involved in a number of strategic cooperations with research institutes and industrial companies for quite a few years now. Establishing networks along value chains and with strategic partners is becoming increasingly important. In turn, this requires personnel to support actual research, e.g. for project management or customer acquisition and retention. This is the reason why the Business Area Networks was restructured as the Science Management Department at the end of 2009. The FBH has therefore also taken into account the increased technology transfer for operational business as well as the growing number of tasks of institute-strategic importance on an organizational level. The principal areas of the new department are divided into three columns: Strategy, Technology Transfer/Marketing, and Training & Education.



Die Abteilung Wissenschaftsmanagement unter Leitung von Nicolas Hübener (ganz links).  
The Science Management Department, headed by Nicolas Hübener (first from left).

## Berlin WideBaSe: Große Bandlücke – lückenlos vernetzt

2009 konnten die im Jahr zuvor begonnenen strategischen Arbeiten zur Vernetzung von Forschung und regionaler Wirtschaft unter dem Stichwort WideBaSe (Wide-Bandgap-Semiconductors) einen Erfolg verbuchen. Im Förderkonzept "Innovative regionale Wachstumskerne" haben die Partner – sieben Unternehmen und drei Forschungseinrichtungen – ein Konzept zur strategischen Zusammenarbeit entwickelt. Dieses wurde im November im Rahmen eines Assessment-Centers erfolgreich begutachtet. Im Juni 2010 starten somit voraussichtlich acht Verbundvorhaben, sieben davon unter Beteiligung des FBH. "Berlin WideBaSe" steht für die regionale Entwicklung, Herstellung und den Vertrieb von optoelektronischen und elektronischen Bauelementen auf der Basis von breitlückigen Halbleitern (WideBaSe). Insbesondere die Abteilung Materialtechnologie sowie die Geschäftsbereiche GaN-Optoelektronik und GaN-Elektronik sind beteiligt. Koordiniert wird das Gesamtvorhaben von der Abteilung Wissenschaftsmanagement.

## Praxisnah: Leibniz-Applikationslabor MiTOS

Das neu aufgebaute Leibniz-Applikationslabor "Microwave Technology, Optoelectronics and Solid State Electronics" (MiTOS) überträgt Forschungsergebnisse in industrielle Anwendungen, indem es praxisnahe Funktionsmuster und Demonstratoren entwickelt. Dort bündeln das FBH und das Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) ihre Kompetenzen zu III/V-Halbleitertechnologien. So können am PDI entwickelte Halbleiterstrukturen, mit denen die Lichterzeugung bei Leuchtdioden und Lasern effizienter wird, in der Lasertechnologie des FBH für neuartige Lichtquellen eingesetzt werden. MiTOS baut auf dem vorhandenen Know-how der Institute auf und entwickelt Labormuster weiter für die Praxis. UV-LEDs des FBH können z. B. mit Ultraschallquellen des PDI für den Einsatz zur Desinfektion von Flüssigkeiten kombiniert werden. So bereitet MiTOS Forschungsergebnisse für Kooperationen mit der Wirtschaft auf und verkürzt damit den Weg vom Forschungsergebnis zum Produkt.

## Berlin WideBaSe: Wide Bandgap – Comprehensively Networked

2009 witnessed the success of the strategic approaches commenced the previous year to network research and regional business under the term "WideBaSe" (Wide Bandgap Semiconductors). The partners – seven companies and three research institutes – have developed a concept for strategic cooperation as part of the program "Innovative regionale Wachstumskerne" (innovative regional centers of growth). This was successfully reviewed within the framework of an assessment center in November. Eight joint research projects, seven with FBH involvement, are planned to start in June 2010. "Berlin WideBaSe" stands for the regional development, production and sales of optoelectronic and electronic devices based on wide bandgap semiconductors (WideBaSe). The Materials Technology Department and the Business Areas GaN Optoelectronics and GaN Electronics are particularly involved in this project. The overall project is coordinated by the Science Management Department.

## Realistic Experiments: Leibniz Application Laboratory MiTOS

The newly structured Leibniz Application Laboratory "Microwave Technology, Optoelectronics and Solid State Electronics" transfers research results into industrial applications by developing practically oriented experimental models and demonstrators. This is where the FBH and the Paul Drude Institute for Solid State Electronics (PDI) bundle their competencies for III-V semiconductor technologies. Semiconductor structures developed at the PDI which ensure more efficient light generation for light emitting diodes and lasers can thus be used in the FBH's laser technology to create innovative light sources. MiTOS is based on the existing know-how of the institutes and further develops laboratory models for practical usage. UV LEDs of the FBH can, for example, be combined with UV sources of the PDI for disinfecting liquids. MiTOS also evaluates research results for cooperation between industry and science, helping to quicken the process from research result to end product.



## FIT FÜR DIE ZUKUNFT: AUSBAU UND ERNEUERUNG DER TECHNISCHEN INFRASTRUKTUR

Im Herbst 2009 hat das FBH die Energie- und Medienversorgung des Reinraums umfassend erneuert und seine technische Infrastruktur ausgebaut. Umfangreiche Zukunftsinvestitionen, unter anderem die Anschaffung einer neuen Elektronenstrahlolithographie-Anlage, schaffen die Voraussetzungen, um auch zukünftig "State-of-the-Art"-Bauelemente am FBH zu entwickeln.

### Energieeffiziente Klima- und Reinraumtechnik

Die Energieeffizienz, von der Energieerzeugung und Verteilung bis hin zur Regelungstechnik, stand im Vordergrund der Umbauarbeiten, die im Rahmen der Konjunkturpakete der Bundesregierung gefördert wurden. Dazu musste der Reinraumbetrieb im Bereich der Prozesstechnologie für zwei Monate komplett eingestellt werden. Dieser Ausfall wurde durch entsprechende Mehr- und Samstagsarbeit der betroffenen Kolleginnen und Kollegen ausgeglichen. Wie ein erster Vergleich zu den Vorjahresmonaten zeigt, führt das intelligente Zusammenspiel der einzelnen Maßnahmen nun zu einer Energieersparnis von etwa 20%. So wurde etwa eine neue Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut. Energieeffiziente Pumpen und Motoren senken den Stromverbrauch im Reinraumbetrieb und eine intelligente Steuer- und Regelungstechnik sichert optimale Energieeinsparungen. Reinraumbedingungen sind zudem bei allen Witterungslagen gesichert. Technische Gase werden nun zentral bereitgestellt, gesteuert und überwacht. Damit werden weniger Einzel-Gasflaschen benötigt und Fläche konnte zurück gewonnen werden.

### Geräteinvestitionen sichern die Zukunftsfähigkeit

Mit den technischen Infrastruktur-Maßnahmen wurden zugleich die baulichen Voraussetzungen für die Installation der neuen Elektronenstrahl-Belichtungsanlage VISTEC SB251 geschaffen. Die Anlage benötigt eine hochkonstante Raumtemperatur, um die nötige Präzision und Prozessstabilität zu gewährleisten. Diese Großinvestition, die Belichtungen mit einer Präzision von unter 50 nm auf 6-Zoll-Wafern erlaubt, ist eines der zentralen Geräte für die Bauelementeentwicklung nach dem neuesten technologischen Stand. In der Materialtechnologie ging zudem eine neue MOVPE-Anlage vom Typ AIX2600G3-HT in Betrieb. Die Multiwafer-Epitaxieanlage ermöglicht die Verarbeitung von 8 x 4-Zoll- und 8 x 3-Zoll-Wafern zur Herstellung Nitrid-basierter Schichtstrukturen, die am FBH in der GaN-Elektronik genutzt werden. Sie ist ausgelegt für sehr hohe Wachstumstemperaturen, wie sie für Aluminiumnitrid benötigt werden. Durch weitere Geräteinvestitionen können am FBH zusätzliche Verfahren und Leistungen angeboten werden: So ermöglicht

## FIT FOR THE FUTURE: EXPANSION AND MODERNIZATION OF FBH'S TECHNICAL INFRASTRUCTURE

In fall 2009, FBH extensively updated the energy and media supply systems of its cleanroom facilities and strengthened the technical infrastructure. In order to keep on developing state-of-the-art devices, FBH has invested in the future by, for example, acquiring a new electron beam lithography tool.

### Energy-Efficient Air Conditioning and Cleanroom Infrastructure

Extensive modernization has been conducted with main focus on improving energy efficiency, from energy production and distribution to the control systems. The construction works were funded by the economic stimulus packages of the German Government. These activities required a shutdown of all cleanroom operations within process technology for two months. By overtime work and extra weekend shifts, the colleagues whose working field has been affected helped to compensate this loss of productivity. A first comparison to last year's months revealed, that the intelligent interaction between the individual measures taken yield energy savings of about 20%. A new ventilation system with heat recovery has been installed, energy-efficient pumps and engines lower energy consumption of the cleanroom, and intelligent control systems assure optimum energy conservation. Additionally, cleanroom conditions can be guaranteed for all meteorological conditions. Technical gases are now provided, controlled and monitored centrally. Hence, less single gas bottles are necessary and floor space could be regained.

### Equipment Investments Assure Sustainability

Along with modernization of the technical infrastructure, structural conditions for the installation of the new electron beam system VISTEC SB251 have been accomplished. The electron beam lithography tool requires an extraordinarily constant room temperature to assure highest precision and process stability. This large-scale investment allows exposures with a precision better than 50 nm on 6 inch wafers and is one of the core tools for FBH's state-of-the-art device development. In materials technology, a new MOVPE reactor AIX2600G3-HT was additionally put into operation. The multi-wafer reactor allows the FBH to process 8 x 4 inch and 8 x 3 inch wafers to manufacture nitride-based layer structures, which are used in GaN electronics. As required for aluminum nitride, the reactor is suited for very high growth temperatures.

Further equipment investments enable the FBH to offer additional processes and services. A newly purchased



Die neue E-Beam gewährleistet Belichtungen mit höchster Präzision.  
The new electron beam assures exposures with highest precision.

eine neu angeschaffte IC-PECVD-Anlage Schichten, die bei niedrigen Temperaturen abgeschieden werden können. Ein Lift-off-Prozessor ermöglicht ein schonendes Lift-Verfahren, bei dem der Wafer erst eingeweicht und dann abgespült wird.

IC-PECVD enables the institute to deposit layers at low temperatures. An immersion lift-off processor allows gentle metal lift-off by soaking wafers before rinsing.

### OPTECBB MIT GESTÄRKTEM UNTERNEHMENSFLÜGEL – GÜNTHER TRÄNKLE BLEIBT VORSTANDSVORSITZENDER

Günther Tränkle wurde im Juli für weitere zwei Jahre als Vorsitzender des Kompetenznetzes für Optische Technologien Optec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e.V. bestätigt; zugleich wurde der Unternehmensflügel im OpTecBB-Vorstand deutlich gestärkt. 2007 war Günther Tränkle erstmalig angetreten, um Forschung und Industrie im Bereich der Optischen Technologien enger zu vernetzen. Diese erfolgreiche Arbeit wird nun weiter intensiviert. Unternehmen sollen dabei frühzeitig in den Forschungs- und Entwicklungsprozess einbezogen werden, damit die Erfordernisse für konkrete Anwendungen bereits in einem sehr frühen Stadium in die Arbeiten einfließen.

### OPTECBB STRENGTHENS ENTREPRENEURIAL SECTION – GÜNTHER TRÄNKLE REMAINS CHAIRMAN

In July, Günther Tränkle was reconfirmed chairman of the competence network for optical technologies Optec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) for another two-year period. At this election, the entrepreneurial proportion within OpTecBB's board was additionally expanded. In 2007, Günther Tränkle has started to intensify cross-linking between research and industry within optical technologies. This already successful work will now be further strengthened. Enterprises shall be involved into research and development processes at an early stage to include industrial requirements for concrete applications as early as possible.



## WOLFGANG HEINRICH IST NEUER PRÄSIDENT DER EUROPEAN MICROWAVE ASSOCIATION

Der langjährige Abteilungsleiter Mikrowellentechnik des Ferdinand-Braun-Instituts und Professor an der TU Berlin, Wolfgang Heinrich, übernahm zum Jahreswechsel 2010 die Präsidentschaft der European Microwave Association (EuMA). Die EuMA hat Mitglieder in ganz Europa und den umliegenden Staaten. Sie gilt als einer der international wichtigsten Zusammenschlüsse von Wissenschaftlern und Ingenieuren in der Mikrowellentechnik. Sie veranstaltet jährlich die European Microwave Week, die vier Konferenzen sowie eine Ausstellung umfasst – mit 1.500 Konferenzteilnehmern und typisch 4.000 Besuchern, neben der International Microwave Week in den USA, die weltweit wichtigste Mikrowellen-Konferenz.

## NEUER NAME: FERDINAND-BRAUN-INSTITUT, LEIBNIZ-INSTITUT FÜR HÖCHSTFREQUENZTECHNIK

Seit Dezember 2009 trägt das FBH "Leibniz" in seinem Namen. Dies bringt die Zugehörigkeit zur Leibniz-Gemeinschaft stärker zum Ausdruck, zugleich wird die etablierte Marke Ferdinand-Braun-Institut beibehalten. In diesem Zusammenhang wurde auch die Wort-Bildmarke angeglichen.



Leibniz  
Ferdinand-Braun-Institut

## GUT INVESTIERT IN DIE ZUKUNFT: AUS- UND WEITERBILDUNG AM FBH

Der Bedarf an qualifizierten und motivierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist groß. Daher bildet das FBH seit vielen Jahren in verschiedenen Ausbildungsberufen aus und hat zudem verstärkt in die Aus- und Weiterbildung seiner Kolleginnen und Kollegen investiert. Dazu gehören auch mehrmonatige Auslandsaufenthalte, die den Horizont und das Wissen erweitern. So hat Katrin Paschke etwa acht Wochen lang an der Princeton University in den USA geforscht. Ziel ihres Forschungsaufenthaltes war die Optimierung eines kompakten Systems für LIDAR-Messungen mithilfe von Halbleiterlasern.

### Ausbildung ist eine Mannschaftsleistung

Neun Mikrotechnologen, ein Feinwerkmechaniker und ein Fachangestellter für Markt- und Meinungsforschung lernten 2009 am FBH. Es steckt viel Arbeit und Engage-

## WOLFGANG HEINRICH IS NEW PRESIDENT OF THE EUROPEAN MICROWAVE ASSOCIATION

At the turn of the year, Wolfgang Heinrich, FBH's long-term Head of Microwave Technology Department and a Professor at the Technische Universität Berlin, took over the presidency of the European Microwave Association (EuMA). EuMA has members from all over Europe and adjacent nations and 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 which comprises four conferences and an exhibition. This event is, beside the International Microwave Week in the United States, the most important microwave conference world-wide with about 1,500 conference participants and typically 4,000 visitors.

## NEW NAME: FERDINAND-BRAUN-INSTITUT, LEIBNIZ-INSTITUT FÜR HÖCHSTFREQUENZTECHNIK

In December 2009, the FBH strengthened the "Leibniz" aspect within its name. The new name emphasizes the Leibniz Association membership while maintaining the established brand "Ferdinand-Braun-Institut". In this context, the logo was slightly adapted.

## WELL-INVESTED INTO FUTURE: EDUCATION AND TRAINING AT FBH

Skilled and motivated staff is highly demanded. Thus, FBH is involved in vocational education within different occupational images since many years and has additionally intensified its effort in further training. This also includes scientist's exchange supporting visits abroad to extend knowledge and to open up horizons. Katrin Paschke, for instance, passed eight weeks researching at Princeton University in the United States. Aim of her research visit was to optimize a compact system for LIDAR measurements by means of semiconductor lasers.

### Education and Training is Team Performance

In 2009, nine microtechnologists, one precision mechanic and one specialist in market and social research have been trained at the FBH. Vocational training requires

gement in der beruflichen Ausbildung, die sich quer durch alle Abteilungen und Geschäftsbereiche, Werkstatt und Technische Dienste zieht. Überall lassen Techniker, Wissenschaftler und Verwaltungsangestellte die Auszubildenden über die Schulter blicken und machen sie fit für den Berufsalltag. Dabei geht es neben der fachlichen Qualifikation darum, die persönlichen und kommunikativen Fähigkeiten zu schulen. Schließlich müssen die Mikrotechnologinnen und Mikrotechnologen im Alltag nicht nur komplexe Arbeitsschritte ausführen, bei denen schon kleinste Ungenauigkeiten zu großen Fehlern führen können. Sie alle müssen auch abteilungsübergreifend ohne Reibungsverluste zusammenarbeiten. Für die persönliche Betreuung bietet das FBH ein Mentorenprogramm mit festen Ansprechpartnern. Auch die von den Auszubildenden gestaltete Vortragsreihe, bei denen sie zweimal jährlich ihre Arbeiten intern präsentieren, gehört zum Ausbildungsspektrum. Wenn nötig wird auch kurzfristig Englischunterricht organisiert.

Einmal im Jahr sichtet Marlies Gielow, am FBH verantwortlich für die gewerbliche Ausbildung und gleichzeitig Vorsitzende des Prüfungsausschusses bei der IHK, Bewerbungsunterlagen für das neue Ausbildungsjahr. Auf die drei neuen Ausbildungsplätze für Mikrotechnologen gibt es etwa 25 Bewerbungen. Sie wünscht sich mehr ausbildungsfähige Bewerber, sieht das FBH dennoch gut aufgestellt: „Die Erfolgsquote unserer Auszubildenden ist hoch, es gibt keine Durchfaller und kaum Abbrecher.“ Viele Auszubildende werden nach dem Abschluss übernommen und der Anteil junger Frauen in dem Beruf kann sich sehen lassen. Dieser ist vielfältig und abwechslungsreich, aber nach wie vor wenig bekannt. Deshalb wird weiterhin direkt vor Ort bei den Jugendlichen, aber auch mit professioneller Netzwerks- und Lobbyarbeit geworben. Die Auszubildenden beteiligen sich tatkräftig an verschiedenen Berufs- und Ausbildungsmessen, beim Girls' Day sowie der Langen Nacht der Wissenschaften.

dedicated involvement from the colleagues all across FBH's departments, business areas, technical services and the metal workshop. Technicians, scientists and administration staff instruct the young people in order to prepare them for daily work routine. Microtechnologists for example have to accomplish complex working steps, many of which may lead to serious failures caused by the slightest inexactness. Consequently, not only professional qualification but also personal and communicative skills need to be trained. Due to the intertwined workflow at the FBH, it is important to support smooth teamwork. Therefore, personal supervision for the apprentices is provided by a mentoring program with assigned contact persons. Part of the training spectrum is also a series of lectures prepared by the trainees, allowing them to present their achievements to an internal audience twice a year. If necessary, even English lessons are organized on short notice.

Once a year, Marlies Gielow looks through application documents to select next year's apprentices. She is responsible for vocational education at the FBH and chairperson of the board of examiners at IHK Berlin. For the actual application period, Marlies Gielow received around 25 applications. She would be glad to find more adequate candidates meeting the necessary requirements for the three microtechnologist training positions offered by the FBH every year. However, she regards the institute doing well in this field: "The success rate of our apprentices is high, with no one failing and a low dropout rate." Many of them are taken over into a regular employment after successful examination and the proportion of young women is fortunately high. The profession is multifaceted but nevertheless little-known. Thus, professional networking and lobbying is still necessary to promote the occupational image and career prospects. The apprentices themselves are actively involved in various job information days and career fairs, as well as in events for the general public such as Girls' Day and Science Night.



Zwei von drei Ausbildungsberufen am FBH: Mikrotechnologe/-in und Industriemechaniker/-in.  
Two of three occupational images at the FBH: microtechnologist and precision mechanic.



## Weiterbildung zum Techniker (Mikrosystemtechnik)

Die beiden Mikrotechnologen Alexander Külberg und Martin Lipsz haben im Februar 2010 ihre achtsemestrige berufsbegleitende Weiterbildung zum staatlich geprüften Techniker Fachrichtung Mikrosystemtechnik erfolgreich abgeschlossen. Mit dem zusätzlich vermittelten Fachwissen schließen sie die Lücke zwischen Facharbeitern und Ingenieuren. Daraus ergeben sich nicht nur neue Sichtweisen auf technische Problematiken, sie können sich nun auch rasch in interdisziplinäre Projektgruppen einbringen. Geschult wurden sie zudem in Bereichen, wie etwa der Qualitätssicherung und des Projektmanagements.



Martin Lipsz und Alexander Külberg im Sägelabor.  
Martin Lipsz and Alexander Külberg in the dicing laboratory.

## Further Training as Technician (Microsystems Technology)

In February 2010, two of FBH's microtechnologists, Alexander Külberg and Martin Lipsz, successfully completed their eight-semester extra occupational training program as state certified technician, subject area microsystems technology. With the additionally gained knowledge, they bridge the gap between skilled workers and engineers. Thus, new perspectives on technical problems arise and they can now quickly contribute to interdisciplinary project groups. Additionally, they were trained in fields such as quality assurance and project management.

## Adlershof Talents

Seit 2008 wird die 18-monatige gemeinsame Adlershofer Fortbildungsveranstaltung "Adlershof Talents" angeboten. Mit praxisorientierten Modulen zu Themen wie Konfliktmanagement, Teamentwicklung und Betriebswissenschaft sollen angehende Führungskräfte aus Wirtschaft und Wissenschaft fit für künftige Leitungsaufgaben gemacht werden. Steffen Knigge hat diese Schulung inzwischen abgeschlossen und beurteilt vor allem die praxisnahe Ausrichtung positiv, zumal sie sich im Alltag bereits das ein oder andere Mal hilfreich gezeigt hat. Auch in der engeren Vernetzung am Standort sieht er Vorteile, die manches auf dem "kurzen Dienstweg" regelt. Zwei weitere KollegInnen, Andrea Knigge und Jörg Wiedmann, befinden sich aktuell in der berufsbegleitenden Maßnahme.

## Adlershof Talents

Since 2008, the 18-month training program "Adlershof Talents" offered for Adlershof institutions trains budding executive staff from economy and science for future leadership positions. FBH scientist Steffen Knigge meanwhile terminated the praxis-oriented program with modules on conflict management, team building as well as business administration. He specifically looked favorably upon the practical orientation, the more so as this knowledge turned out to be helpful in daily routine. Additionally advantageous is the intensified cross-linking within the science and technology park opening up short communication lines. Currently, two further FBH colleagues, Andrea Knigge and Jörg Wiedmann, are trained in the extra occupational program.

## ANH Berlin: Professionelles Ausbildungsmanagement positiv evaluiert

Das Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin (ANH Berlin) hat seine erfolgreiche Arbeit fortgesetzt. Besonders hervorzuheben ist die produktive Zusammenarbeit des FBH-Teams mit den eingebundenen Berufsschulen. Von der Herangehensweise und der Nachhaltigkeit der Aktivitäten zeigte sich auch Cornelia Quennet-Thielen bei ihrem Besuch im Februar beeindruckt. Die Staatssekretärin am BMBF diskutierte mit den Kolleginnen und Kollegen des ANH Berlin und weiteren Projektpartnern, wie die Nachwuchsförderung in der Mikro- und Nanotechnologie, den Optischen Technologien und der Solarbranche weiter verbessert werden kann. Als Best-Practice-Beispiel wurde die vom ANH Berlin herausgegebene Potenzialanalyse "Ausbildungsbestimmende Faktoren in den Hochtechnologien Mikrosystemtechnik, Optik und Nanotechnologie im Raum Berlin" durch das Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) ausgewählt und veröffentlicht. Im Herbst wurde das Netzwerk zudem durch die Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung mbH sehr positiv evaluiert.

## ANH Berlin: Positive Evaluation of Professional Education Management

The High-Technology Education Network Berlin (ANH Berlin) has continued its successful work. The productive cooperation between the FBH team and the associated vocational colleges is especially noteworthy. Cornelia Quennet-Thielen was particularly impressed with the actual approach and the sustainability of the activities during her visit in February. The State Secretary at the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and colleagues from the ANH Berlin and other project partners discussed how the promotion of budding skilled employees for micro and nanotechnology, optical technologies and the solar sector can be improved. As a best practice example the German Federal Institute for Vocational Education and Training (BIBB) chose and published the potential analysis "Ausbildungsbestimmende Faktoren in den Hochtechnologien Mikrosystemtechnik, Optik und Nanotechnologie im Raum Berlin" issued by the ANH Berlin. Furthermore, the network received a very positive evaluation from the Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung mbH (GIB Innovation Research and Consultancy) in autumn.



Staatssekretärin Cornelia Quennet-Thielen lässt sich von der Auszubildenden Elisabeth von Papen die Exponate erklären.  
Apprentice Elisabeth von Papen explains exhibits to State Secretary Cornelia Quennet-Thielen.

## EVENTS UND FEIERLICHKEITEN

### Jubiläumssymposium 100 Jahre Adlershof "Licht - Materialien - Modelle"

Das Symposium "Licht - Materialien - Modelle", war der Beitrag der außeruniversitären Forschungseinrichtungen und der HU Berlin zum 100-jährigen Jubiläum des Standorts. Für die Organisation waren die Chairmen Günther Tränkle und Michael Linscheid (HU Berlin) verantwortlich. Sie konnten für die Impulsvorträge den Nobelpreisträger Peter A. Grünberg und die beiden Leibniz-Preisträger Felix Otto und Andreas Tünnermann gewinnen. Die Vorträge der Adlershofer Wissenschaftler, u.a. von Andreas Wicht vom FBH zeigten, welchen Beitrag die hier erforschten Technologien für die Lösung drängender gesellschaftlicher Zukunftsfragen, beispielsweise in der Energieversorgung oder der Mobilität leisten.

Die Chairmen des Adlershofer Jubiläumssymposiums: Günther Tränkle und Michael Linscheid.  
Chairmen of the Adlershof anniversary symposium: Günther Tränkle and Michael Linscheid.

### 100 Jahre Nobelpreis Ferdinand Braundamals und heute

"Von der Funktelegrafie zu modernen Wireless-Technologien" – unter diesem Motto feierte das Ferdinand-Braun-Institut am 2. November 2009 die Nobelpreisverleihung an seinen Namensgeber vor 100 Jahren. Festredner war Prof. Dr. Georg Fischer von der Universität Erlangen-Nürnberg mit seinem Vortrag "Funktechnik für das Internet unterwegs – leistungsstark und effizient".

### Lange Nacht der Wissenschaften

Auch 2009 öffnete das FBH seine Türen wieder zur Langen Nacht der Wissenschaften. Mit über 1.600 Besuchern gab es erneut einen leichten Besucheranstieg. Neue Experimente kombiniert mit dem bewährten Programm sorgten für Gedränge in den Räumen. Für die erstmalig gezeigten Transistoren, die auch in 300°C heißem Zinn funktionieren, interessierten sich nicht nur die Besucher, es konnten auch neue geschäftliche Kontakte geknüpft werden.

## EVENTS AND CELEBRATIONS

### Anniversary Symposium 100 Years Adlershof "Light - Materials - Models"

The symposium "Light – Materials – Models" was the contribution of extra-university research institutions and the HU Berlin to Adlershof's 100-year anniversary. Günther Tränkle and Michael Linscheid (HU Berlin) were appointed chairmen and thus responsible for the overall organization. Keynote speakers were Peter A. Grünberg, winner of the Nobel Prize, and the two Leibniz Prize winners Felix Otto and Andreas Tünnermann. The lectures of Adlershof scientists, including Andreas Wicht from the FBH, pointed out how technologies being investigated here contribute to issues affecting future's society, such as energy supply and mobility.



### 100 Years Nobel Prize Ferdinand Braun Now and Then

"From radio telegraphy to modern wireless technologies" was the motto for the Ferdinand-Braun-Institut's celebration of its eponym being awarded with the Nobel Prize 100 years ago. Prof. Dr. Georg Fischer from Universität Erlangen-Nürnberg opened the event with a keynote lecture about "radio technology for mobile internet – powerful and efficient".

### Science Night

Also in 2009, the FBH opened its doors for the Science Night. With more than 1,600 guests, the number of visitors rose again slightly. New experiments combined with established program, ensured crowded rooms during the event. Transistors, that even work in 300°C hot tin, were presented for the first time. This attracted not only the visitors but also established new business contacts.

## Auszeichnung für den schönsten Staffelstab

Bei der diesjährigen 5 x 5 km Teamstaffel ging das FBH am 10. und am 12. Juni mit vier Mannschaften an den Start. Dabei waren die Teams nicht nur läuferisch gut aufgestellt sondern auch im Wettbewerb um den schönsten Staffelstab erfolgreich. Sportlich aktiv war das FBH bei weiteren Events wie dem Beach Soccer Cup oder der Marathonstaffel.

Helmar Dittrich mit den prämierten Staffelstäben.  
Helmar Dittrich with the awarded batons.

## FBH-Kinderfest: Spaß mit dem Nachwuchs

Im Mai vergnügte sich der Nachwuchs von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern auf dem FBH-Kinderfest, das bereits zum zweiten Mal stattfand. Mit einer Hüpfburg, bei verschiedenen Spielen, Schminken und Bobbycar-Rennen, kam das Kinderfest bei den kleinen und größeren Besuchern gut an. Doch das FBH bietet nicht nur Spaß sondern auch konkrete Unterstützung: Dank Kinderspielzimmer und dem Betreuungsangebot im nahe gelegenen Kinderhotel Kinderzeit können Betreuungslücken schnell und unkompliziert überbrückt werden.

## Award for the Most Beautiful Baton

This year's 5 x 5 km team relay revealed that FBH's talents are not necessarily restricted to sporting achievements. In particular, one of the four teams who started on June, 10<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> was honored for the most beautiful baton. FBH teams additionally participated in further sports events such as beach soccer cup and marathon relay.



## FBH Children Party: Fun with the Kids

In May, the offspring of FBH's employees enjoyed their time at the FBH children party, which was already organized for the second time. With the inflatable jumper, various games, face painting and a bobby car race, the party was a great event not only for the kids. However, the institute not only offers entertainment, but also real support with children. The FBH children room and round-the-clock care offered by the close-by kids hotel "Kinderzeit", quickly and uncomplicatedly helps parents with childcare vacancies.

## FRAUEN – GLEICHSTELLUNG – FAMILIENFREUNDLICHKEIT

### TOTAL E-QUALITY Prädikat verliehen

Am 22. Juni 2009 wurde dem Ferdinand-Braun-Institut in München das TOTAL E-QUALITY Prädikat für die erfolgreiche Umsetzung von Chancengleichheit am Institut verliehen. In der Begründung der Jury hieß es, dass das Institut besonders im Bereich der Frauenförderung aktiv ist, beginnend beim Wecken des naturwissenschaftlichen Interesses bei Schülerinnen bis hin zur Karriereförderung von Frauen. Hervorgehoben wurden auch die zahlreichen Maßnahmen, mit denen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bei der Vereinbarkeit von Familie und Beruf unterstützt werden.



## WOMEN – EQUAL OPPORTUNITY – FAMILY FRIENDLINESS

### Awarded with the TOTAL E-QUALITY Certificate

In June 2009, the Ferdinand-Braun-Institut was awarded with the TOTAL E-QUALITY certificate for successful implementation of equal opportunity. The statement of the jury highlighted, that the institute is particularly active in equal opportunity for women, from encouraging schoolgirls into science and technology to career enhancement of women. Additionally, the numerous measures supporting co-workers with their work-life balance were pointed out.

### Doktorandinnen-Netzwerk gegründet

2009 wurde ein Doktorandinnen-Netzwerk am FBH ins Leben gerufen, in dem sich die Doktorandinnen zum Erfahrungsaustausch treffen, um künftig regelmäßig Probleme und Anliegen zu diskutieren und diese an die Institutsleitung heranzutragen. So wurde beispielsweise der Wunsch nach mehr Informationen über nichtfachliche Weiterbildungsprogramme geäußert, wie sie an der HU Berlin und der TU Berlin für Mitarbeiterinnen und Studentinnen angeboten werden.

### Ferdinand-Braun-Institut erneut familienfreundlichster Betrieb Treptow-Köpenicks

Im September zeichnete der Bezirk Treptow-Köpenick das Ferdinand-Braun-Institut mit dem 1. Preis im Wettbewerb "Familienfreundlicher Betrieb Treptow-Köpenick 2009" aus. Der mit 400,- Euro dotierte Preis wurde von Bezirksbürgermeisterin Gabriele Schöttler und Staatssekretärin Almuth Nehring-Venus überreicht. 2006 war das Ferdinand-Braun-Institut bereits einmal gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt mit dem ersten Platz ausgezeichnet worden.

### Network for Female Ph.D. Students Established

A network for female Ph.D. students has been launched in 2009 at the FBH in order to exchange experiences periodically. Aim is to discuss problems and concerns on a regular basis and to keep the management informed about findings of the network. One of the matters discussed was to receive more information about advanced training programs beyond professional knowledge transfer, like offered by the HU and TU Berlin universities to their female co-workers and students.

### Ferdinand-Braun-Institut once again Most Family-Friendly Workplace in Treptow-Köpenick

In September, the district awarded the Ferdinand-Braun-Institut with the first prize in the contest "family-friendly workplace in Treptow-Köpenick". The prize, which is endowed with 400,- Euro, has been handed over by District Mayor Gabriele Schöttler and State Secretary Almuth Nehring-Venus. The FBH has already been awarded with the first prize in 2006 together with the German Aerospace Center.

# GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

## MIKROWELLENKOMPONENTEN UND -SYSTEME

Die Arbeiten des FBH im Bereich der Mikrowellenbauelemente und -schaltungen umfassen die vollständige Wertschöpfungskette von der Epitaxie und Prozesstechnologie bis hin zu CAD, Messtechnik und Chipaufbauten. Aufgrund der am FBH verfügbaren Technologien liegt der Schwerpunkt auf III/V-Halbleitern – in diesem Falle der GaN-Elektronik – und der zugehörigen Design- und Messtechnik-Kompetenz. Hier stehen Leistungsbau-elemente für den Frequenzbereich 2 bis 10 GHz im Vordergrund. Darüber hinaus werden Millimeterwellen-ICs im Frequenzbereich 10 bis 100 GHz bearbeitet, speziell für Low-Power- oder Radar-Frontends. Dabei wird mittlerweile ausschließlich auf SiGe-HBT- und RF-CMOS-Prozesse zurückgegriffen (externe Foundries). Im Aufbau befinden sich die Aktivitäten zu MMICs für Frequenzen oberhalb 100 GHz auf Basis des am FBH entwickelten InP-HBT-Transfersubstrat-Prozesses.

Bauelemente aus dem FBH sind Schlüsselkomponenten für die drahtlose Kommunikation (Basis-Stationen für die Mobilkommunikation, Breitband-Richtfunk) und die Sensorik (Radarsensoren im Automobil, Sensor-Netzwerke). Auch Mikrowellen-Plasmaquellen gehören zum Portfolio, für die Leistungs-Mikrowellenelektronik zusammen mit Strukturen zur Plasma-Anregung integriert wird.

Im Einzelnen umfasst das Forschungsgebiet folgende Themen, die gemeinsam von den Geschäftsbereichen Mikrowellenkomponenten und -systeme sowie GaN-Elektronik bearbeitet werden:

- GaN-Hochleistungs-Transistoren (HEMTs) und -MMICs für Frequenzen von 2 bis 10 GHz und den Leistungsbereich 10 bis 100 W
- Robuste rauscharme GaN-MMIC-Verstärker
- Millimeterwellen-Frontends (24 und 77 GHz, RF-CMOS und SiGe-HBT)
- InP-HBTs mit Transitfrequenzen oberhalb 400 GHz
- Integrierte Mikrowellen-Quellen zur Plasma-Erzeugung im 2 GHz-Band

Die zugehörigen GaN-Prozesse werden von den Technologie-Abteilungen des FBH bzw. dem Geschäftsbereich GaN-Elektronik entwickelt und gepflegt. Ein Reinraum-Labor mit industrie-kompatiblen Gerätepark ermöglicht es, Bauelemente entsprechend dem neuesten Stand der Technik herzustellen. Die Abteilung Mikrowellentechnik ist ein Kompetenzzentrum für Mikrowellen- und Millimeterwellen-Design und die entsprechende Aufbautechnik. Leistungsfähige Methoden zur dreidimensionalen elektromagnetischen Simulation, der Transistormodellierung und dem Schaltungsentwurf sind sowohl Gegenstand der Forschung als auch Werkzeuge zur Entwicklung von Komponenten. Eine spezialisierte Messtechnik ermöglicht die Charakterisierung bis zu Frequenzen von 110 GHz.

## MICROWAVE COMPONENTS AND SYSTEMS

The FBH research activities in the field of microwave devices and circuits cover the entire value-added chain from epitaxy and processing to computer-aided design, measurements, and packaging. As a consequence of the technology available at FBH, the focus is on III-V-semiconductor components – in this case GaN devices – and the corresponding design and measurement background. FBH mainly targets power components (discretes and MMICs) for the frequency range between 2 and 10 GHz. An additional topic are millimeter-wave integrated circuits (10 to 100 GHz), with special emphasis on low-power and radar frontends. For this purpose, SiGe-HBT and RF-CMOS processes are applied, using external foundries. Emerging are activities on MMICs for frequencies beyond 100 GHz, based on the InP-HBT transferred-substrate process developed at FBH.

The devices developed at the FBH represent key components for wireless communications (cellular radio base stations, broad-band radio links) and sensors (automotive radar, sensor networks). Also in the portfolio are microwave plasma sources, integrating power electronics together with excitation structures for plasma generation.

In detail, the main topics of research in this field include:

- GaN high-power transistors (HEMTs) and MMICs for 2 to 10 GHz with 10 to 100 W output power
- Robust low-noise GaN amplifier MMICs
- Millimeter-wave frontends (24 and 77 GHz, RF-CMOS and SiGe-HBT)
- InP-HBTs with transit frequencies above 400 GHz
- Integrated microwave sources for plasma generation (2 GHz range)

These activities are pursued jointly with the Business Area GaN Electronics. The relevant GaN processes are developed and maintained by the FBH technology departments and the Business Area GaN Electronics, respectively. A clean-room laboratory with industry-level equipment offers 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 110 GHz.

## KLASSE-S-SCHALTVERSTÄRKERKONZEPT FÜR HF-LEISTUNGSMODULE

Effiziente drahtlose Kommunikationssysteme benötigen effiziente Leistungsendstufen, da das Energiebudget des Gesamtsystems hauptsächlich vom Verbrauch der Verstärker-Endstufen abhängt. Neue Konzepte, insbesondere jene, die auf Schaltbetrieb basieren, gewinnen deshalb zunehmend an Aufmerksamkeit. Eines der am weitesten fortgeschrittenen ist das Klasse-S-Konzept. Bei diesem Verfahren wird das Eingangssignal mithilfe eines Bandpass- $\Delta\Sigma$ -Modulators (BPDSM) in ein 1-Bit-Signal umgewandelt, hier mit einer Bitrate von ca. 1,8 Gbit/s. In der erzeugten, nicht-periodischen Bitfolge sind Amplitude und Phase des ursprünglichen Signals kodiert. Diese Bitfolge wird dann durch einen Leistungsschalter verstärkt und anschließend durch ein Filter demoduliert.

Im Rahmen der Arbeiten zu Klasse-S-Verstärkern am FBH wurde zunächst die Strommodus-Topologie ausgewählt (Abb. 1). Diese besteht aus zwei Leistungsschaltern, deren Ausgangsstrom die Eingangsbitfolge nachbildet. Die Last liegt parallel zum Rekonstruktionsfilter. Der Leistungsschalter wird als GaN-MMIC mit der FBH-Technologie realisiert und besteht aus einem Leistungstransistor mit einer Gateweite von 4 mm und einem Treibertransistor mit geringerer Gateweite. Bei Breitbandbetrieb mit digitalen Signalen erreichen die Schaltungen bei Ausgangsleistungen von 15 W eine Effizienz von 90%. Doch diese Werte können nicht direkt auf den Klasse-S-Betrieb übertragen werden und die Effizienz eines Klasse-S-Verstärkers wird sowohl durch die Leistungsschalter als auch durch das Ausgangsfilter bestimmt.

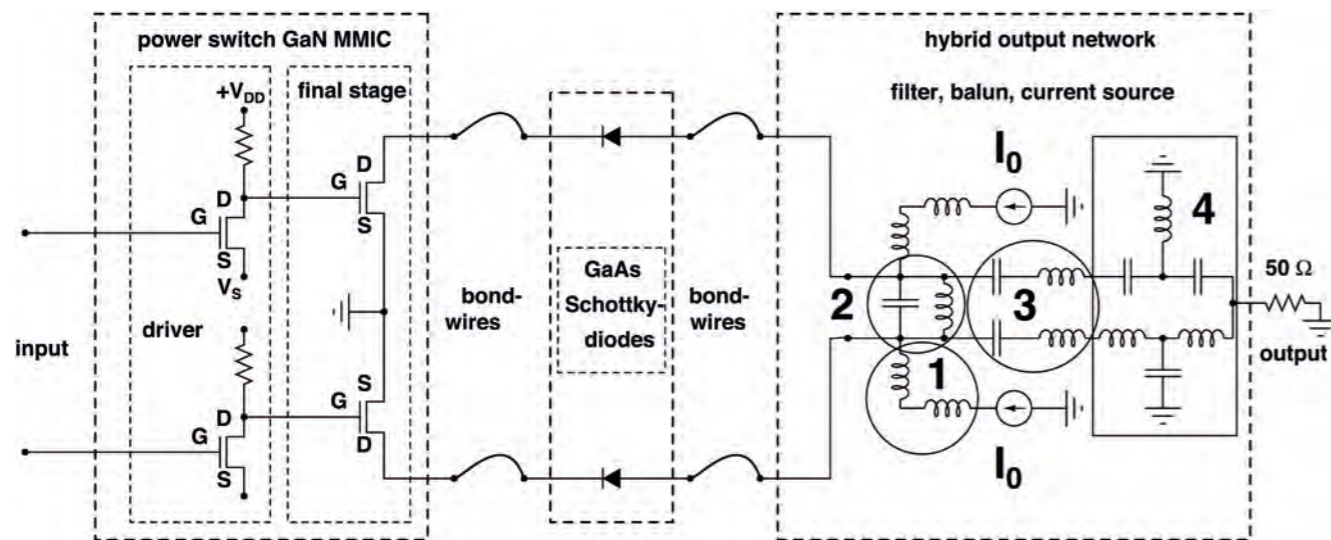


Abb. 1: Schaltbild des hybriden Klasse-S-Verstärkers für eine Signalfrequenz von 450 MHz.  
Fig. 1: Circuit diagram of the hybrid class-S amplifier at 450 MHz.

## CLASS-S AMPLIFIER CONCEPT FOR RF POWER MODULES

The power amplifier represents one of the most essential and, with regard to efficiency, most critical building blocks of any transceiver in wireless communications. Thus, concepts for highly efficient power amplifiers have been subject of intensive research during the last years. These efforts are presently focusing on switch-mode topologies. One of the most advanced ones is the class-S amplifier: The analog input signal around  $f_0$ , which can be a harmonic sinusoidal signal as well as WCDMA, OFDM, etc. is converted to a digital one by means of a band-pass delta-sigma modulator (BPDSM). Its sampling frequency corresponds to the bit rate of the resulting digital signal and is determined by the over-sampling ratio, typically 4 times the signal frequency  $f_0$ . This bit sequence is then amplified by means of power switches. At the output, the analog signal is reconstructed from the bit stream by a band pass filter.

For the first realizations, the current-mode topology of class-S has been chosen (Fig. 1) consisting of two power switches which are driven by a differential input signal. These power switches were realized as MMICs using the FBH GaN-HEMT technology. They consist of a final stage transistor with a gate width of 4 mm and a common source driver with a passive load using a smaller transistor. In broadband digital operation, these MMICs achieve a drain efficiency of 90% at output powers in the 15 W range. But this result cannot simply be related to the class-S condition, and the efficiency of the class-S amplifier depends not only on the efficiency of the power switches but also on the losses due to the output network.

Abb. 2 zeigt ein Foto des realisierten Klasse-S-Verstärkers mit hybrid aufgebautem Ausgangsnetzwerk. Abb. 1 veranschaulicht das Ersatzschaltbild des kompletten Aufbaus. Das Schaltbild zeigt den Chip mit den beiden Verstärkerzügen und die am Ausgang angeschlossene Filterstruktur mit Parallelkreis (2), Serienkreisen (3) und den Drosseln (1) zur Realisierung einer Stromquelle gemäß der Strommodus-Klasse-S-Architektur. Das Filter ist so dimensioniert, dass es für die in der Endstufe verwendeten GaN-HEMTs den zweifachen Wert der optimalen Lastimpedanz bereitstellt. Das bedeutet, dass der maximale Strom im Schaltbetrieb nur jeweils die Hälfte des Drain-Sättigungsstroms erreicht. Diese Maßnahme führt zwar zu einer Erhöhung der Gateweite, ist aber vorteilhaft, weil der resultierende On-Widerstand  $R_{dson}$  der Transistoren und damit die Verluste sinken.

Abb. 3 zeigt das gemessene Spektrum des Ausgangssignals für ein BPDS-Signal bei einer Bitrate von 1,8 Gbit/s. Die typische BPDS-Rauschformung um 450 MHz herum ist gut zu erkennen. Die maximale Ausgangsleistung bei 450 MHz beträgt ca. 9 W. Die Effizienz des gesamten Verstärkers in diesem Zustand liegt bei 34%. Eine maximale Effizienz von 41% wurde bei 2 W Ausgangsleistung erreicht.

Fig. 2 presents a photo of the realized current-mode class-S amplifier while Fig. 1 features the circuit diagram. The output network is realized as a hybrid circuit. It includes the reconstruction band-pass filter consisting of a parallel resonator (2), a series resonant circuit (3) and GaAs-Schottky diodes to protect the final stage transistors from negative voltage swings. Additionally, inductors are used for the current feeding (1). The filter was designed so that it presents twice the optimum differential output impedance of the used final stage  $2 \times 8 \times 250 \mu\text{m}$  GaN HEMTs. This means that in operation the switched current through each transistor equals only half of the maximum drain current. This oversizing leads to an increase of transistor size, but is advantageous for efficiency since it reduces the on-resistances of the transistors  $R_{dson}$  and thus the losses.

Fig. 3 depicts the spectra of the input and output signal for an analog signal frequency of 450 MHz (corresponding to a BPDS bitrate of 1.8 Gbit/s). The spectrum shows the typical noise shaping of a BPDS modulation around the signal frequency. In terms of power and efficiency, a maximum output power of 9 W at 450 MHz was measured, with a drain efficiency of 34%. A maximum efficiency of 41% has been obtained at an output power of 2 W.

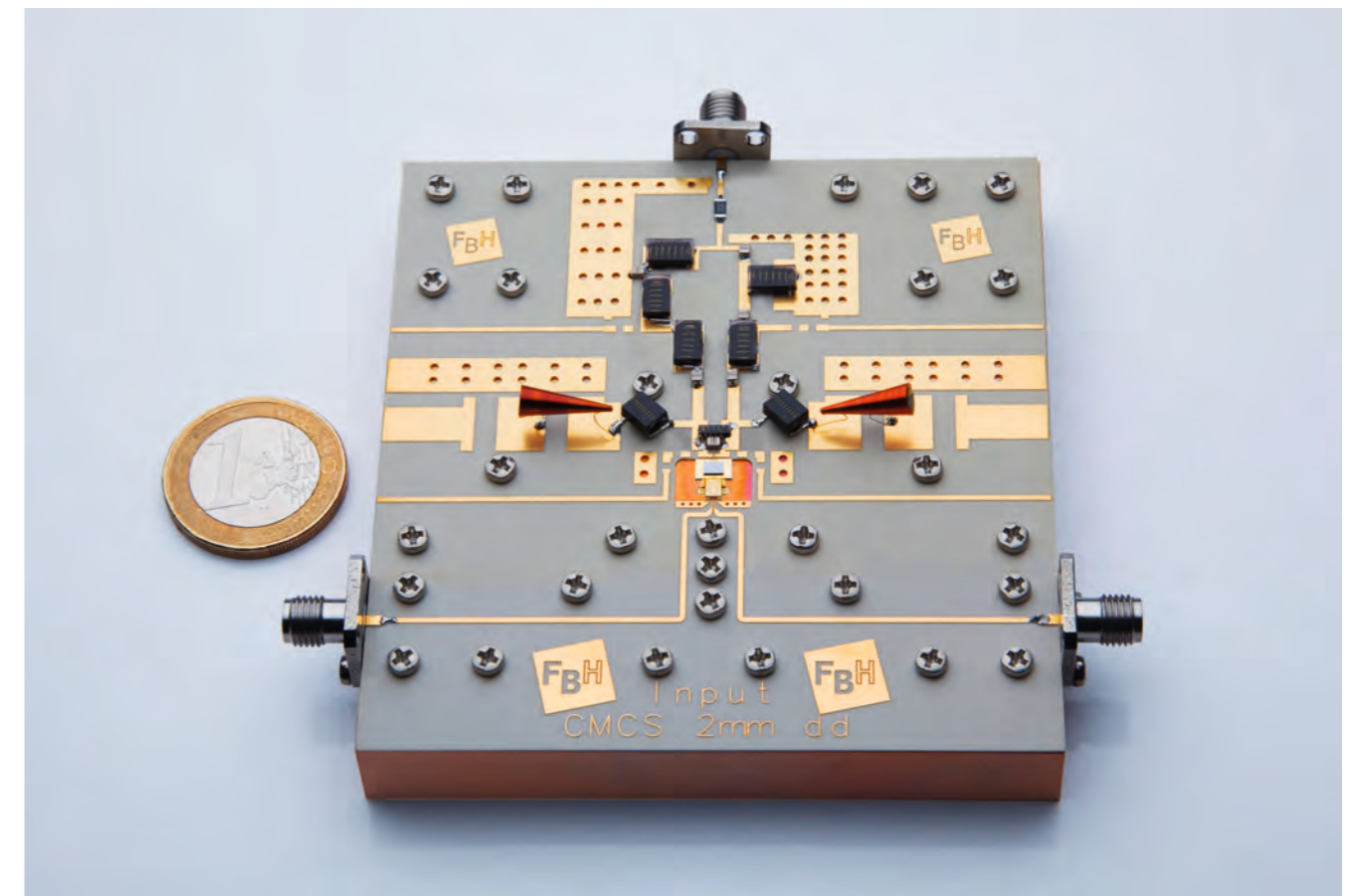


Abb. 2: Realisierter Klasse-S-Verstärker im Strommodus.  
Fig. 2: Current-mode class-S amplifier realized.

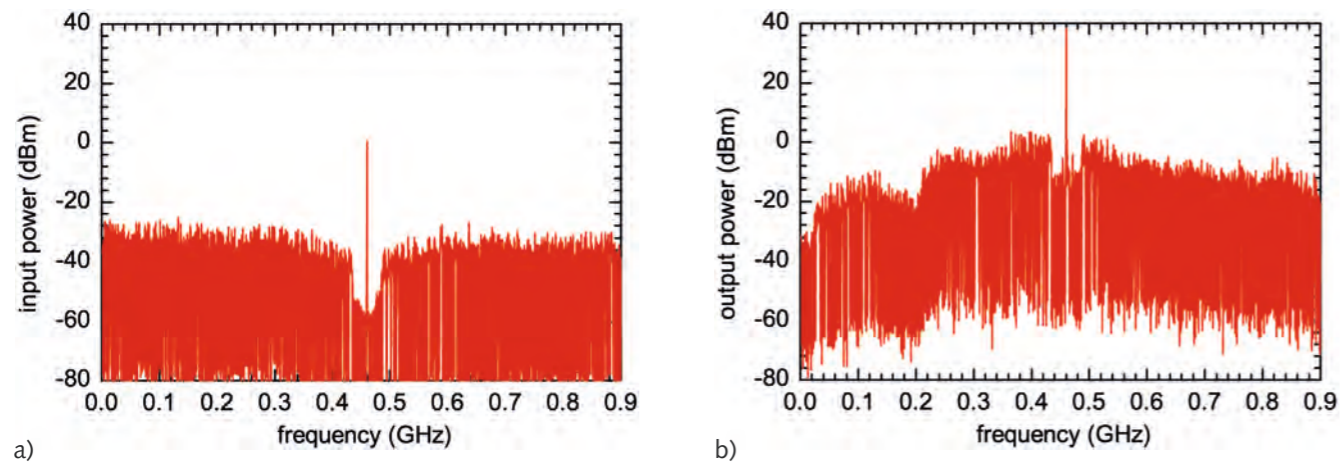


Abb. 3: Spektrum des (a) Eingangs- und (b) Ausgangssignals des Klasse-S-Verstärkers. Die Frequenz des analogen Signals beträgt 450 MHz, die Bitrate des BPDS-Signals ist 1,8 Gbit/s.  
 Fig. 3: Spectra of the (a) input and (b) output signals of the class-S amplifier. Frequency of the analog signal is 450 MHz, bitrate of the BPDS-signal is 1.8 Gbit/s.

Die Ergebnisse demonstrieren die Machbarkeit des Klasse-S-Konzeptes im Mikrowellenbereich. Die Effizienzwerte sind jedoch im Vergleich zu anderen Konzepten noch zu gering und müssen verbessert werden. Dies betrifft zum einen die On-Widerstände der Transistoren und der Schutzdioden, die bei der Strommodus-Topologie zu den Haupt-Verlustmechanismen gehören. Ein zweiter wichtiger Aspekt ist das verwendete digitale Modulationsverfahren. Die konventionelle Bandpass-Delta-Sigma-Modulation (BPDSM) hat eine zu geringe Kodier-Effizienz bezüglich der Signalamplitude. Das Potenzial des Verstärkers wird deutlich, wenn man die Schaltung in Klasse-D betreibt, d.h. am Eingang anstelle der BPDS-Folge eine Bitfolge mit 450 MHz Signalfrequenz anlegt. Dann liefert derselbe Verstärker eine Ausgangsleistung von 19 W mit 59% Drain-Effizienz – im Vergleich zu 9 W bzw. 34% im Falle der BPDS-Modulation.

These results demonstrate feasibility of the class-S concept at microwave frequencies, but the efficiency values obtained are not yet competitive with other concepts and need to be improved. One issue is to systematically optimize the on-resistances of final-stage transistors and protection diodes, which for the current-mode topology belong to the main loss contributors. A second important aspect is the digital modulation scheme used. The conventional band-pass delta-sigma modulation (BPDSM) is non-optimal because of its low amplitude coding efficiency. The potential of the amplifier can be assessed from the fact that, applying class-D excitation (i.e., a square-wave signal at 450 MHz) instead of BPDSM, the same amplifier delivers 19 W output power with 59% drain efficiency instead of 9 W and 34%, respectively.

## Veröffentlichungen // Publications

C. Meliani, J. Flucke, A. Wentzel, J. Würfl, W. Heinrich, and G. Tränkle, „Switch-Mode Amplifier ICs with over 90% Efficiency for Class-S PAs using GaAs-HBTs and GaN-HEMTs”, in Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Atlanta, USA (2008).

C. Meliani, A. Wentzel, J. Flucke, E. Ersoy, N. Chaturvedi, R. Lossy, F. Schnieder, B. Janke, S. Freyer, H-J. Würfl, and W. Heinrich, „Class-S Amplifier at 450 MHz Using GaN-HEMT Power Switch MMICs”, Zeitschrift für Telekommunikation, Frequenz 3/4 (2009).

A. Wentzel, F. Schnieder, C. Meliani, W. Heinrich, „A Simplified Switch-Based GaN HEMT Model for RF Switch-Mode Amplifiers”, Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 77 - 80, Rome, Italy (2009).

A. Wentzel, C. Meliani, W. Heinrich, „RF Class-S Power Amplifiers: State-of-the-Art Results and Potential”, to be presented at IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, USA (2010).

## ROBUSTE RAUSCHARME VERSTÄRKER MIT KURZER ERHOLUNGSZEIT

Im Hinblick auf Schaltungen, die ein geringes Rauschen erfordern, gewinnt die GaN-Technologie zunehmend an Bedeutung. GaN-HEMTs können bei hohen Leistungen betrieben werden und haben gleichzeitig niedrige Rauschzahlen. Diese Eigenschaften können für verbesserte Empfänger-Architekturen mit einfacherem Aufbau genutzt werden. Bei sehr robusten rauscharmen Verstärkern (LNAs) kann zum Beispiel auf die Eingangsschutzschaltung verzichtet werden – diese dämpft stets das Eingangssignal und ruft zusätzliches Rauschen hervor. Ein besonders linearer LNA stellt außerdem geringere Anforderungen hinsichtlich der Bandselektionsfilter und ermöglicht dadurch rekonfigurierbare Empfängerstrukturen.

Speziell bei Anwendungen in gepulsten RADAR-Systemen sind nicht nur eine niedrige Rauschzahl und hohe Robustheit des LNAs gefragt. Die Eingangsübersteuerung findet in solchen Systemen hauptsächlich beim Einkoppeln des ausgesendeten Signals in den Empfänger statt. Deshalb muss der LNA auch eine kurze Erholungszeit haben, d.h. er muss unmittelbar nach Ende des Sendepulses wieder betriebsbereit sein. Im hier betrachteten gepulsten Radarsystem ist eine Erholungszeit unterhalb 1,5  $\mu$ s gefordert. In einem traditionellen System würde der LNA-Eingang durch einen schnellen Schalter geschützt werden, der aber einen Durchgangsverlust von unter 1 dB aufweisen muss, um die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems nicht zu verschlechtern. Wenn auf den Schalter verzichtet werden kann, vereinfacht sich der Aufbau des RADAR-Systems.

Die Erholungszeiten von robusten GaN-LNAs wurden bisher in der Literatur nicht thematisiert. Deshalb wurde die Erholungszeit hier genauer untersucht. Dafür wurde ein sehr robuster X-Band-LNA-MMIC entworfen und hergestellt (siehe Chip-Foto in Abb. 1).

## HIGHLY ROBUST LOW-NOISE AMPLIFIERS PROVIDING FAST RECOVERY

GaN technology gains increasing attention also with regard to low-noise applications. The potential of GaN HEMTs to sustain high powers, and even to operate at high power levels while simultaneously providing low noise figures, can be exploited for receivers with improved performance and simplified architectures. Highly rugged low-noise amplifiers (LNAs) for example can operate without an input protection circuit that always attenuates the signal and adds noise. A highly linear LNA additionally reduces the requirements for the band-select filter, and thereby enables reconfigurable receiver designs.

Especially for pulse-RADAR applications it is not only required that the LNA provides a low noise figure and high ruggedness. The main cause of input overdrive in such a system is the coupling of the transmit signal to the receiver. Therefore, the LNA also needs to provide a short recovery time, meaning that the LNA is operable again immediately after the transmit pulse has ended. In the targeted pulse-RADAR system, recovery time is required to be faster than 1.5  $\mu$ s. In a traditional design, the LNA input would be protected by means of a fast switch. However, the switch needs to provide an insertion loss below 1 dB in order to not degrade the overall system performance. Omitting the switch therefore simplifies and potentially improves the RADAR system.

However, recovery times of rugged GaN LNAs have not been addressed in the literature so far. Therefore, recovery time was investigated in detail, and a highly rugged X-band LNA MMIC was designed and fabricated. The chip photo is shown in fig. 1. The LNA shows excellent performance and high ruggedness, as displayed in fig. 2, providing S-parameters and noise figures measured before and after the LNA was subjected to 40 dBm (10 W) pulsed microwave power.

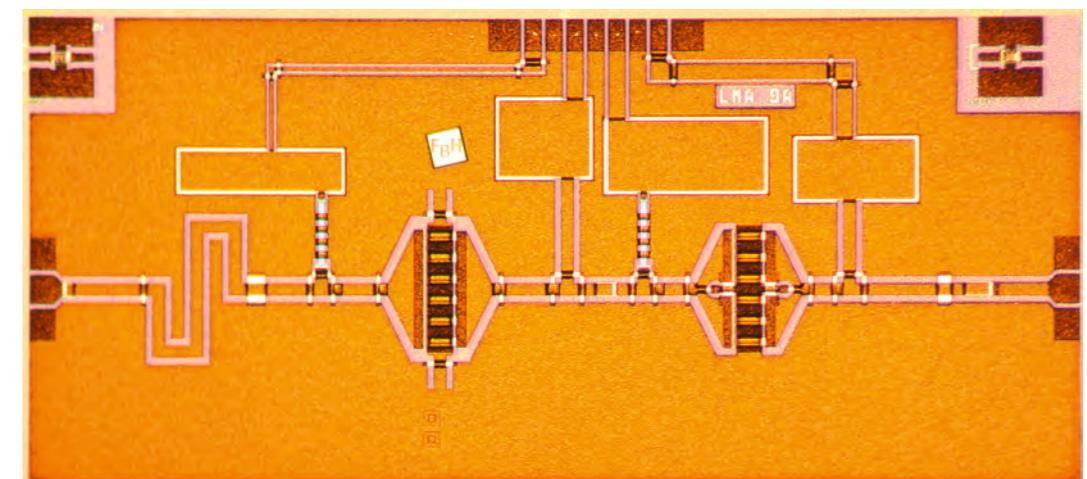


Abb. 1: Robuster X-Band LNA-Chip.  
 Fig. 1: Robust X-band LNA chip.

Der LNA zeigt ausgezeichnete Leistungsparameter und eine starke Robustheit. Abb. 2 zeigt die gemessenen S-Parameter und Rauschzahlen bevor und nachdem der LNA 40 dBm (10 W) starker gepulster Mikrowellenleistung ausgesetzt wurde. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Erholungszeit von den RC-Zeitkonstanten am Gate bestimmt wird. Diese Zeitkonstanten bestimmen den zeitlichen Verlauf der Wiederherstellung der ursprünglichen Gatevorspannung wenn das starke Stör-signal abgeklungen ist. Abb. 3 zeigt eine Messung des Erholvorgangs, bei der das S<sub>21</sub> des LNA bei 8 GHz infolge eines 250 ns langen Pulses hoher Leistung bei 2 GHz zusammenbricht (durchgezogene Linien) und wie es unmittelbar nach dem Impuls zum Anfangswert zurückkehrt. Die Auflösungsbegrenzung infolge der Bandbreite des Messsystems ist mit gestrichelten Linien dargestellt.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass durch sorgfältige Wahl des DC-Zuführungswiderstandes und der Abblock-Kondensatoren extrem kurze Erholungszeiten von unter 30 ns erreicht werden können, ohne die Robustheit des LNAs einzuschränken.

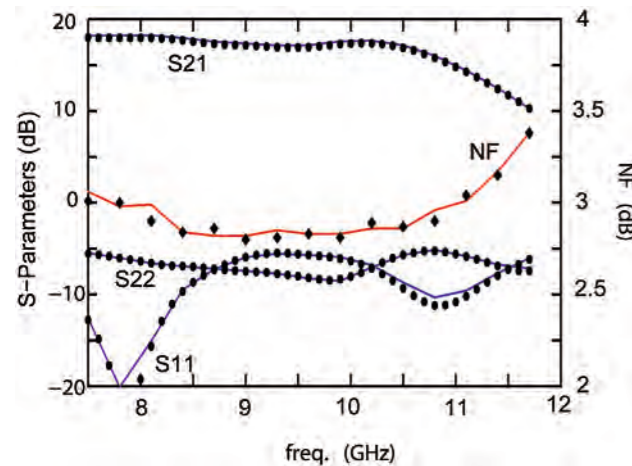


Abb. 2: S-Parameter und Rauschzahl im 50-Ohm-System (NF50) des robusten LNA, gemessen bei U<sub>dd</sub> = 15 V und I<sub>dd</sub> = 300 mA. Symbole: gemessen vor dem Stresstest, Linien: gemessen nach dem Stresstest.  
Fig. 2: S-parameters and noise figure NF50 of the robust LNA, measured at U<sub>dd</sub> = 15 V, I<sub>dd</sub> = 300 mA. Symbols: measured pre-stress, lines: post-stress measurement.

Recovery time turned out to be determined by the RC time constants present at the gate. These factors influence recovery of the gate bias voltage after the stress signal has disappeared. Recovery time was also experimentally investigated through measurements. Fig. 3 shows how the LNA S<sub>21</sub> at 8 GHz is compromised due to a 250 ns high-power pulse at 2 GHz (solid lines) and how it recovers to its initial value immediately after the pulse. The dashed lines indicate the resolution limitation due to the measurement bandwidth.

In conclusion, through careful choice of gate DC feed resistance and blocking capacitances, extremely short recovery times below 30 ns can be achieved without compromising ruggedness.

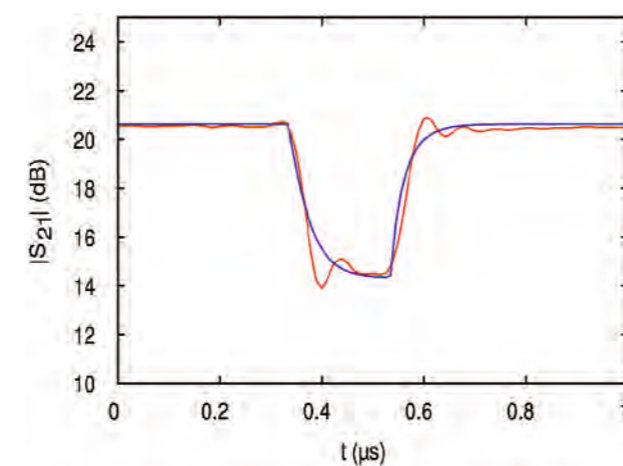


Abb. 3: Gemessenes S<sub>21</sub> des LNA beim Auftreten eines 250 ns langen Übersteuerungsimpulses (durchgezogene Linien). Die Antwort eines idealen 30 MHz-Tiefpasssystems mit einem Pol (gestrichelte Linie) zeigt die Bandbreitenbegrenzung des Messsystems.  
Fig. 3: Measured response of LNA S<sub>21</sub> on 250 ns overdrive pulse (solid lines). The response of a 30 MHz ideal single-pole low-pass system (dashed curve) indicates the measurement system's bandwidth limitation.

## Veröffentlichungen // Publications

M. Rudolph, M. Dewitz, A. Liero, I. Khalil, N. Chaturvedi, Ch. Wipf, R.M. Bertenburg, J. Miller, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, „Highly Robust X-Band LNA with Extremely Short Recovery Time“, in: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 781-784 (2009).

A. Liero, M. Dewitz, S. Kühn, N. Chaturvedi, J. Xu, M. Rudolph, „On the Recovery Time of Highly Robust Low-Noise Amplifiers“, IEEE Trans., Microwave Theory Tech., vol. 58 no. 4, pp. 781 - 787, April (2010).

## 77 GHz SIGE-RECEIVER FÜR KFZ-RADAR

In Kraftfahrzeugen der Oberklasse sind Abstandswarnradargeräte, die Entfernung und Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug ermitteln, mittlerweile Stand der Technik. Diese Fahrassistenzsysteme, die auch als Adaptive Cruise Control (ACC) bekannt sind, werden immer leistungsfähiger. Aktuelle Entwicklungen zielen darauf, die räumliche Auflösung des Radars durch eine digitale Richtkeulenformung und -schwenkung (Digital Beamforming) deutlich zu erhöhen. Dies ist die Voraussetzung für bildgebende Verfahren, mit denen z.B. mehr als nur ein vorausfahrendes Fahrzeug erfasst werden kann. Damit lässt sich die Verkehrssicherheit erheblich steigern.

Im Rahmen eines externen Auftrags wurde am FBH ein Mehrkanalempfänger für ein derartiges ACC-Radar entwickelt. Als Technologie kam ein auf Silizium-Germanium Heterobipolartransistoren (SiGe-HBT) beruhender Prozess des IHP Frankfurt/Oder zur Anwendung („SG25“), der Transitfrequenzen bis 200 GHz aufweist. Durch den Einsatz der SiGe-Technologie im Vergleich zu anderen III/V-Halbleitern sinken die Kosten, was wegen der Vielzahl der beim Digital Beamforming benötigten Kanäle auf der Empfängerseite eine besondere Rolle spielt. Im Verlauf des Entwicklungsauftrags wurden zunächst Teilschaltungen wie rauscharme Vorverstärker, Mischer, Lokaloszillator-Verteilverstärker, Koppler, Transformatoren und Flip-Chip-Übergänge für 77 GHz entwickelt. Diese Teilschaltungen wurden anschließend zu Ein- und Zweikanalempfängern integriert.

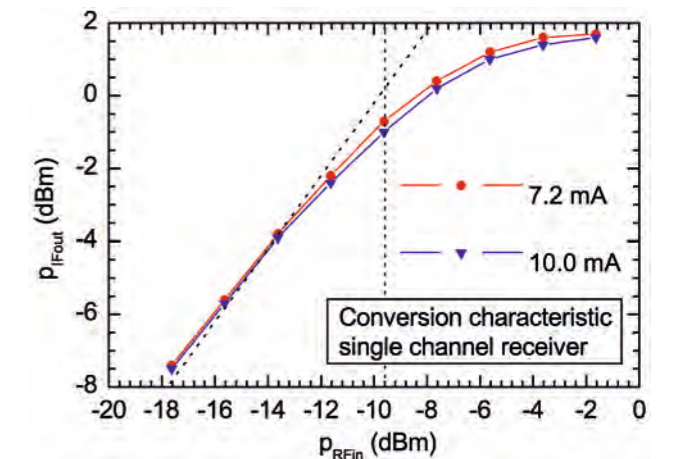
Abb. 1: Kompressionscharakteristik des Einkanalempfängers für zwei Kollektorstromwerte der Transkonduktanzstufe.  
Fig. 1: Compression characteristics of the single-channel receiver for two different collector current values of the transconductance stage.

An dieser Stelle soll der Einkanalempfänger vorgestellt werden, bestehend aus einem rauscharmen Vorverstärker (LNA), zwei Kopplern und einem auf der Gilbert-Zellen-Topologie basierenden aktiven Mischer. Vorverstärker und Mischer sind sowohl auf Rauscharmut als auch auf Großsignalfestigkeit hin optimiert. Hervorzuheben ist dabei die Möglichkeit zur Flip-Chip-Montage, die die Übertragung von Signalen im 77-GHz-Frequenzbereich auf den Chip einschließt. Diese ist besonders kostengünstig und eignet sich für die Massenfertigung. Die geringe Leistungsaufnahme von ca. 45 mW ist ebenfalls ein herausragendes Merkmal dieser Entwicklung. Bei der Umsetzung des Empfangssignals aus dem Frequenzbereich um 77 GHz in einen Zwischenfrequenzbereich bis etwa 1 GHz bietet der Empfänger eine Konversionsverstärkung von ca. 10 dB und eine Rauschzahl von ca. 12 dB.

## 77 GHz SIGE RECEIVER FOR AUTOMOTIVE RADAR

Meanwhile, radar-based adaptive cruise control (ACC) systems are part of the standard configuration in high-end cars. This ACC radar measures distance and velocity difference to the cars in front and automatically adjusts a car's speed to keep it a safe distance from the vehicle ahead of it. Improvements of such radar systems mainly aim at raising the spatial resolution, which can be achieved by digital beamforming. This allows to apply improved imaging methods, thus detecting more than one vehicle in front, for instance. Features like this represent a significant progress in road safety.

In the framework of an industrial contract, the FBH developed a multi-channel receiver for ACC application. As chip technology, the process „SG25“ of IHP Frankfurt/Oder was chosen, which is based on a silicon germanium heterojunction bipolar transistor (SiGe-HBT) and offers transit frequencies up to 200 GHz. Using SiGe technology promises cost reduction compared to III-V alternatives. This fact is particularly important on the receiver side, as multi-channel receivers are necessary for digital beamforming applications.

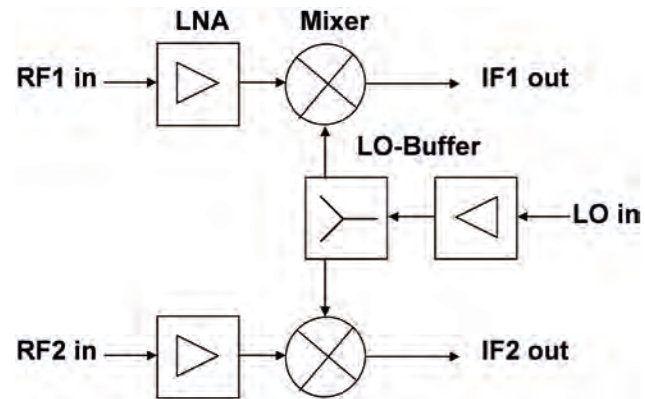


In a first step, the basic circuit blocks of the receiver were developed, such as low-noise amplifiers, mixers, amplifiers for distributing the local oscillators signal, baluns, transformers and flip-chip interconnects for the 77 GHz frequency range. In the next step, these building blocks were integrated into single and dual channel receivers. What is presented here is the single-channel receiver, which consists of a low-noise amplifier (LNA), two baluns and a Gilbert-cell topology-based active mixer. Both low noise amplifier and mixer are optimized for low noise figure as well as for high linearity. A flip-chip mounting technology is used for packaging, providing 77 GHz interconnects to the chip and offering a cost-effective method well-suited for mass production at the same time. The low power consumption of only 45 mW is a further remarkable result of this development.



Der eingangsbezogene 1-dB-Kompressionspunkt liegt bei etwa -10 dBm (Abb. 1) und übertrifft damit die meisten publizierten Werte deutlich.

In einem weiteren Integrationschritt wurden nicht nur zwei derartige Empfängerzüge auf einem Chip mit den Abmessungen 3870 x 1960  $\mu\text{m}^2$  (Abb. 3) kombiniert, sondern auch ein Verteilverstärker für das Lokaloszillatorsignal hinzugefügt, so dass beide Empfänger mit ein und demselben Lokaloszillator versorgt werden können (Abb. 2).



The receiver converts the input signal in the 77 GHz band down to the output signal in the intermediate frequency range of up to 1 GHz with a conversion gain of approximately 10 dB at a noise figure of 12 dB. The input-related 1 dB compression point reaches almost -10 dB (see Fig. 1) and thus considerably exceeds most values published so far.

In a subsequent integration step, two of such receiver channels were combined on one chip. Additionally, a distribution amplifier for the local oscillator signal was integrated on-chip. This allows to feed both receivers with the same local oscillator signal, see Fig. 2. The two-channel receiver chip measures 3870 x 1960  $\mu\text{m}^2$  in size, see Fig. 3.

Abb. 2: Blockschaltbild des realisierten 77-GHz-Zweikanalempfängers.  
Fig. 2: Block diagram of the 77 GHz dual-channel receiver realized.

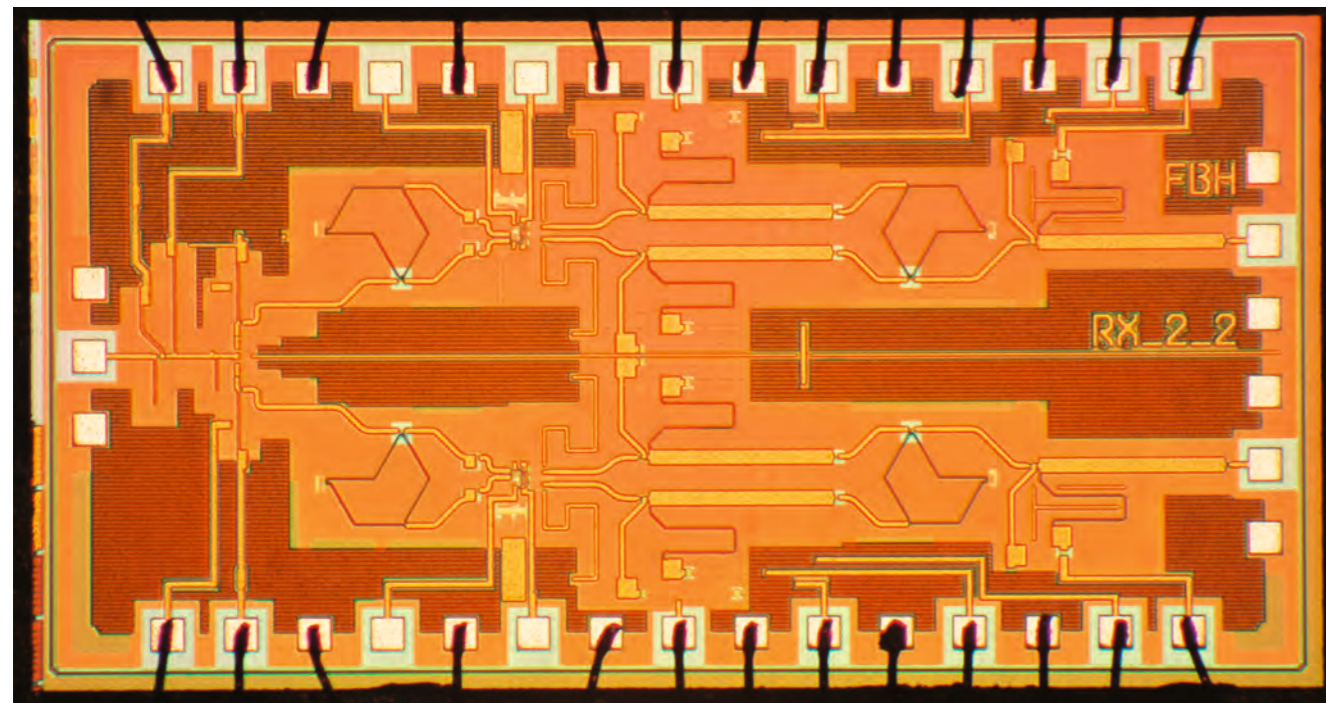


Abb. 3: Chipfoto des realisierten 77-GHz-Zweikanalempfängers.  
Fig. 3: Chip photograph of the 77 GHz dual-channel.

## PLASMAQUELLEN FÜR MEDIZINISCHE ANWENDUNGEN

Die Aktivitäten auf dem Gebiet der Mikrowellen-Plasmaquellen wurden am FBH auch im Jahre 2009 fortgesetzt und ausgeweitet. So konnte das Projekt "Desinfektion, Entkeimung und biologische Stimulation der menschlichen Haut durch gesundheitsfördernde Licht- und Plasmaquellen (BioLiP)" erfolgreich abgeschlossen werden. Im Rahmen dieses BMBF-geförderten Projektes wurde eine Plasmaquelle zur medizinischen Behandlung der menschlichen Haut entwickelt (Abb. 1) – die positive medizinische Wirkung bei der Behandlung von Hautzellen mit Stickstoffmonoxid (NO) konnte dabei nachgewiesen werden. Dazu wurden von Projektpartnern Untersuchungen an Zellkulturen durchgeführt, die gezeigt haben, dass die Zellen die Behandlung mit der Plasmaquelle unbeschadet überstehen. Weiterhin wurde NO in den Zellen nachgewiesen und eine signifikante Wirkung auf die Zellteilung festgestellt: NO interagiert in den Zellen mit Proteinen, was entscheidend für seine physiologische Wirkung ist. Mit diesen Ergebnissen wurden wichtige Grundlagen für erste klinische Untersuchungen geschaffen, die nun folgen sollen.

## PLASMA SOURCES FOR MEDICAL APPLICATIONS

In 2009, FBH's activities in the field of microwave plasma sources were continued and expanded. The project "disinfection, sterilization and biological stimulation of human by health-supporting light and plasma sources (BioLiP)" could be successfully finished. Within the scope of this BMBF-funded project, a plasma source was developed which can be used for medical treatment of human skin (Fig. 1) – the positive medical effect of treating skin cells with nitrogen monoxide (NO) has been proven. Cell cultures studies performed by project partners showed that the cells are not killed by plasma treatment. Furthermore, NO could be detected within the cells and a significant effect on cell division was found: NO interoperates in the cells with proteins what is decisively for its physiological effect. These results created an important basis for first clinical investigations which are to follow now.



Abb. 1: Plasmaquelle für die medizinische Hautbehandlung.  
Fig. 1: Plasma source for medical skin treatment.

Die FBH-Plasmaquelle ist zudem unkompliziert einsetzbar, da sie bei Atmosphärendruck arbeitet und lediglich eine normale Stromversorgung erfordert. Zur Anregung werden Mikrowellen genutzt, die im Inneren der Quelle ein hochdichtes Mikroplasma erzeugen, welches kontinuierlich aufrechterhalten werden kann. Obwohl metallische Elektroden verwendet werden, treten keine Instabilitäten wie zum Beispiel Streamer auf – das zugeführte Prozessgas wird daher sehr effizient aktiviert. Getestet wurden insbesondere zwei Prozessvarianten: Für die medizinische Hautbehandlung ist die Bildung von NO sehr wichtig, da so der Heilungsprozess verbessert werden kann. Soll die Plasmaquelle dagegen zur Desinfektion eingesetzt werden, wird Ozon ( $O_3$ ) benötigt. Beides kann mit der Mikrowellen-Plasmaquelle vorteilhafterweise aus normaler Luft hergestellt werden. Durch Variation des Luftflusses kann dabei zwischen beiden Betriebsarten hin- und hergeschaltet werden (Abb. 2).

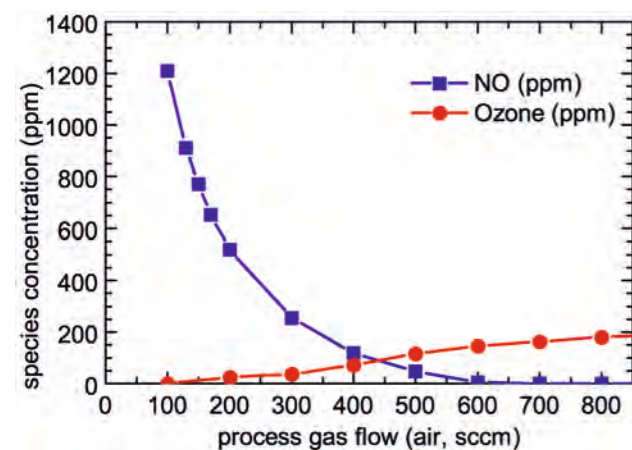


Abb. 2: Erzeugung von NO und  $O_3$  durch die atmosphärische Plasmaquelle. Messungen: Dr. Bibinov, Ruhr-Universität Bochum.  
Fig. 2: Production of NO and  $O_3$  by the atmospheric plasma source, Measurements: Dr. Bibinov, Ruhr-Universität Bochum.

Aus technischer Sicht hat die Quelle den besonderen Vorteil, dass die Plasmaelektrode mit dem Resonator und dem Mikrowellenoszillator in einer kompakten Einheit integriert ist. Dabei fungiert der Resonator als Elektrode und als frequenzbestimmender Schwingkreis und dient gleichzeitig zur Impedanztransformation zwischen der Plasmaimpedanz und der Ausgangsimpedanz des Leistungstransistors. Letzterer ist ein GaN-HEMT, der am FBH entwickelt und hergestellt wurde. Damit ist die Plasmaquelle in ihrem technischen Konzept und den Plasmaeigenschaften weltweit einzigartig.

Dieses wurde durch eine Elektronikentwicklung möglich, die sich auf neu entwickelte Methoden der elektrischen Plasmacharakterisierung stützt. Zur Entwicklung effizienter Oszillatorschaltungen ist eine genaue Kenntnis der dynamischen Impedanzverhältnisse unerlässlich. Insbesondere der transiente Übergang von der Leerlaufimpedanz des Resonators ohne Plasma zum belasteten Betrieb mit Plasma ist dabei von großer Bedeutung.

The FBH plasma source can be easily applied, since it works at atmospheric pressure and requires only a conventional electricity supply. For plasma excitation, microwaves are used to produce high-density plasma inside the source and which can be sustained in continuous mode. Although metallic electrodes are used, no instabilities like streamers appear – hence, the process gas supplied is activated very efficiently. In particular, two process variations were evaluated: For medical skin treatment the production of NO is essential in order to improve the healing process. If on the other hand the plasma source should be used for disinfection, ozone ( $O_3$ ) is required. Both operation modes can be served with the microwave plasma source using normal air as process gas. By changing the air flow, the process can be toggled between both modes (Fig. 2).

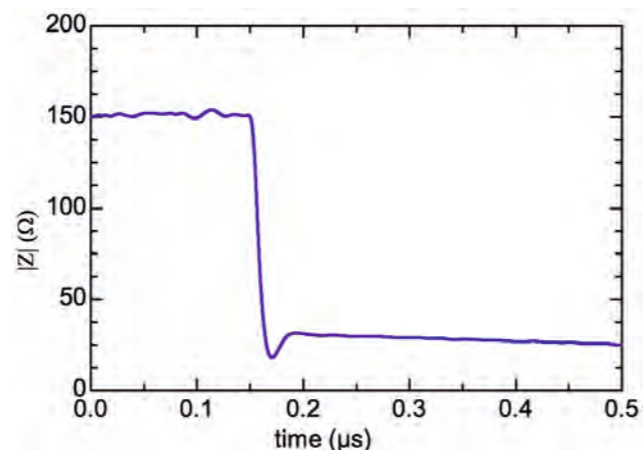


Abb. 3: Zeitaufgelöste Messung der Plasmaimpedanz während der Zündung.  
Fig. 3: Time-resolved plasma impedance during ignition.

From a technical view, the specific advantage of the source is that plasma electrode, resonator and microwave oscillator are integrated in one compact unit. The resonator incorporates the electrode and establishes the operation frequency. At the same time, the resonator provides impedance transformation between plasma and source impedance of the power transistor. Latter is a GaN HEMT which has been developed and produced at the FBH. This technical concept and the plasma quality achieved makes the plasma source worldwide unique.

A novel electronic circuit design based on advanced methods for electrical plasma characterization is the technological basis. For the development of such efficient oscillator circuits, an exact knowledge of the dynamic impedance behavior is essential. In particular, the transient of the impedance of the unloaded resonator to the plasma-loaded resonator is one of the crucial factors.

Es stellt sich die Messaufgabe, eine Mikrowellenimpedanz in einem Leistungszweig mit hoher zeitlicher Auflösung zu messen. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Wellenamplituden über einen Richtkoppler ausgekoppelt und mit einem schnellen Digital-Speicher-oszilloskop in Echtzeit erfasst werden. Unter Verwendung eines speziellen Kalibrierverfahrens und einer mathematischen Transformation kann daraus der zeitliche Verlauf der Lastimpedanz berechnet werden. Die Bandbreite reicht dabei im Prinzip bis zur Trägerfrequenz, die zeitliche Auflösung wird also nur durch die mathematische Randbedingungen begrenzt (Abb. 3).

To measure microwave impedances under high-power conditions with a high time resolution was the challenge to meet. For this purpose, a method has been developed which uses directional couplers and a fast real-time digital scope for data acquisition. With it, a bandwidth which extends up to the carrier frequency can be achieved, the time resolution of the impedance transients is only limited by mathematical restrictions (Fig. 3).

## Veröffentlichungen // Publications

H.-E. Porteanu, S. Kühn, and R. Gesche, „Low-Power Microwave Plasma Conductivity”, IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 37, no. 1, pp. 44-49 Jan. (2009).

H.-E. Porteanu, S. Kühn, and R. Gesche, „Ignition Delay for Atmospheric Pressure Microplasmas”, Contrib. Plasma Phys. 49, No. 1-2, 21-26 (2009).

R. Kovacs, N. Bibinov, P. Awakowicz, H.-E. Porteanu, S. Kühn, and R. Gesche, „An Integrated Atmospheric Microwave Plasma Source”, Plasma Processes and Polymers, No. 6, (2009).

P. Awakowicz, N. Bibinov, M. Born, B. Busse, R. Gesche, A. Helmke, A. Kaemling, V. Kolb-Bachofen, R. Kovacs, S. Kuehn, J. Liebmann, N. Mertens, U. Niemann, C. Oplaender, H.-E. Porteanu, J. Scherer, C. Suschek, W. Vioel, and D. Wandke, „Biological Stimulation of the Human Skin Applying Health-Promoting Light and Plasma Sources”, Contrib. Plasma Phys. vol. 49, no. 9, pp. 641-647 (2009).

R. Gesche, S. Kühn, H.-E. Porteanu, R. Kovacs, and J. Scherer, „A Novel Atmospheric Microplasma Source with Integrated GaN HEMT Microwave Power Oscillator”, 52<sup>nd</sup> Annual Technical Conference Proceedings, Santa Clara, CA, May 9-14, 2009, ISSN 0737-5921, pp. 293-296 (2009).

# GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

## GAN-ELEKTRONIK

Der Geschäftsbereich GaN-Elektronik beschäftigt sich mit der Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von GaN-Bauelementen für die Mikrowellentechnik und die Leistungselektronik. Er deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab, von der Epitaxie bis zu fertig montierten Bauelementen. Diese werden kundenspezifisch für Industrie- und Projektpartner entwickelt. Dabei werden die erforderlichen Prozessmodule entwickelt, optimiert und in einen Gesamtprozess integriert, der anschließend stabilisiert und reproduzierbar zur Verfügung gestellt wird.

Alle Entwicklungen beruhen auf dem synergetischen Zusammenwirken von physikalischer und thermischer Bauelementsimulation, Epitaxie, Prozesstechnologie, Mikrowellendesign und -charakterisierung sowie Lebensdauermessungen und der Analyse von potenziellen Ausfallmechanismen. Die Arbeiten erfolgen eng abgestimmt mit den beteiligten Abteilungen und Geschäftsbereichen.

Folgende Mikrowellen-Leistungsbaulemente werden gegenwärtig entwickelt:

- Kompakt aufgebaute Mikrowellen-Leistungsbarren in thermisch und elektrisch optimierten Gehäusen für Ausgangsleistungen von bis zu 100 W bei 2 GHz
- Leistungstransistoren für Hochstimpulse (ns-Bereich)
- Hochleistungs-Bauelemente mit optimierter Linearität
- MMICs für Switchmode-Verstärker (Klasse S) auch kombiniert mit integrierten schnellen Schutzdioden
- Mehrstufige X-Band-Leistungs-MMICs

Die Arbeiten zu GaN-basierten Hochleistungs-Schalttransistoren konzentrieren sich auf:

- Normally-off-Schalttransistoren für hohe Betriebsspannungen (bis 1000 V) mit geringen Einschaltwiderständen und hoher Stromtragfähigkeit (bis 150 A). Hier konnten mit p-dotierten Gatestrukturen Weltbestwerte erreicht werden.
- Skalierfähige, thermisch optimierte Transistordesigns für die Flip-Chip-Montage auf Aluminiumnitrid-Submounts - die Voraussetzung für Leistungs-Schalttransistoren mit sehr hohen Stromtragfähigkeiten sind.

Alle Entwicklungen werden begleitet von Zuverlässigkeitsmessungen, Analysen und Interpretationen möglicher Degradationsmechanismen. Diese Ergebnisse ermöglichen eine kontinuierliche Verbesserung. Die Zuverlässigkeitsmessverfahren bestehen aus on-Wafer Screening-Tests sowie thermisch aktivierten DC- und RF-Langzeittests. Da viele der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf den raschen Technologietransfer zielen, bestehen in diesem Bereich verschiedene strategische Industriekooperationen. Die Vermarktung von GaN-Prototypen läuft zudem 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. It covers the full value chain from epitaxy to completely packaged devices for customers and project partners. Here, the corresponding process modules are to be developed, optimized and integrated in a complete process flow, which has to be subsequently stabilized and kept available in a reproducible manner.

All developments are based on the synergetic interaction between device simulation (physical, thermal), epitaxy, processing technology, microwave design and characterization as well as lifetime measurements and the analyses of potential degradation mechanisms. These activities require an intensive interaction with all contributing departments and business areas.

With respect to microwave power applications, the following devices are being developed:

- Compact power bar devices including thermally and electrically optimized packaging for output power levels up to 100 W at 2 GHz
- Power transistors for high current pulsing (ns range)
- High-power devices with engineered linearity
- Switch-mode amplifier MMICs (class S), also combined with integrated fast Schottky protection diodes
- Multistage X-band power MMICs

Activities concerning GaN-based high-power switching transistors focus on:

- Normally-off switching transistors for high voltages (up to 1000 V) with low on-state resistance and high current capability (up to 150 A). World best values could be obtained here with p-doped gate structures.
- Scalable thermally optimized transistor designs for flip-chip mounting on aluminum nitride submounts. These developments set the base for power switching transistors with very high current capability.

Reliability characterizations combined with analyses and understanding of possible degradation mechanism are routinely performed. The results feed back into technological development cycles and therefore ensure continuous device improvement. Reliability testing techniques such as on-wafer robustness tests as well as long-term thermally accelerated DC and RF degradation tests are routinely performed. Many of the R & D activities within this field are aiming to be transferred into an industrial environment. Hence, various strategic co-operations with industrial partners have been established. In addition, the FBH spin-off BeMiTec AG (Berlin Microwave Technologies) brings GaN prototypes to the market.

## ERHÖHUNG DER LINEARITÄT VON GAN-BASIERTEN MIKROWELLENTRANSISTOREN DURCH OPTIMIERTE EPITAKTISCHE STRUKTUR

Heterojunction-Feldeffekttransistoren (HFETs) auf GaN-Basis eignen sich hervorragend als Hochleistungs-Mikrowellenbauelemente und werden in drahtlosen Kommunikationssystemen wie z.B. Mobilfunk-Basisstationen eingesetzt. Die Übertragung höherer Datenmengen erfordert eine hohe Systemlinearität bei gleichbleibend hoher Effizienz, um Energie sowie Kosten für zusätzliche Kühlung zu sparen. Der Leistungsverstärker ist dabei die Komponente der Basisstation, die sich durch ein oft sehr nichtlineares und ineffizientes Verhalten auszeichnet. GaN-basierte HFETs-Transistoren verfügen über eine hohe Leistungsdichte und ermöglichen somit die geforderte Ausgangsleistung bei kleineren Bauelementen und damit geringere parasitäre Verluste. Mit optimierten epitaktischen Schichtdesigns ist es möglich, diese Verluste weiter zu reduzieren und ein Optimum zwischen Linearität und Effizienz zu finden.

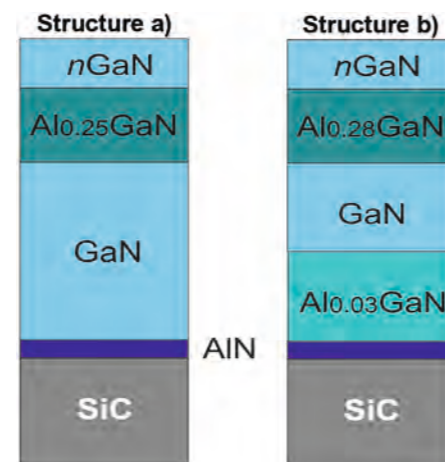
Abb. 1: Epitaktische Struktur für die vergleichende Analyse: a) Standard-Struktur; b) Struktur mit AlGaIn-Barriere im Puffer.  
Fig. 1: Epitaxial structures used for comparison: a) standard structure; b) structure with AlGaIn back barrier in buffer.

Mit der am FBH verfügbaren Technologie zur Herstellung von GaN-Powerbars wurden HFETs mit unterschiedlichen Epitaxiedesigns entsprechend Abb. 1 hergestellt. Alle Wafer wurden auf 3" semiisolierenden Substraten gefertigt. Im FBH-Mikrowellen-Messlabor wurden die Intermodulationsverzerrungen (IMD) nach dem Zweiton-Prinzip in verschiedenen Arbeitspunkten der Bauelemente gemessen. Das anschließend berechnete Verhältnis von Trägerleistung zur Leistung bei der dritten Harmonischen (C/I3) wird verwendet, um Transistoren auf Basis der verschiedenen epitaktischen Strukturen miteinander zu vergleichen. Abb. 2 stellt ein Beispiel für Ergebnisse der Zweiton-IMD-Messungen dar. Zur weiteren Charakterisierung des nichtlinearen Verhaltens werden systemrelevante Signale, wie zum Beispiel WCDMA-Signale, verwendet.

Abb. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen C/I3-Verhältnis und Ausgangsleistung für die in Abb. 1 gezeigten epitaktischen Strukturen. Die dargestellten Intermodulationsprodukte dritter Ordnung wurden aus Klasse-A-IMD-Messungen an 2 x 125 µm-Transistoren berechnet.

## LINEARITY IMPROVEMENT OF GAN-BASED MICROWAVE TRANSISTORS BY OPTIMIZATION OF THE EPITAXIAL DESIGN

Heterojunction field effect transistors (HFETs) based on GaN are excellent candidates for high-power microwave applications, in particular for base stations for wireless communication systems. The need for higher data rates increases demand for system linearity while efficiency should remain high to save energy and reduce costs for cooling systems. The most non-linear and inefficient part of a base station is the power amplifier. GaN-based HFETs transistors feature a high power density and provide the required output power at a reduced device size and therefore less parasitic losses. Optimizing thin film epitaxial designs is one of the possible ways to further reduce these losses and find an optimum between linearity and efficiency.



FBH GaN powerbar technology has been used for the fabrication of HFETs with different epitaxial designs according to Fig. 1. All wafers have been grown on 3-inch diameter semi-insulating SiC substrates. The state-of-the-art microwave measurement laboratory at FBH is then used to evaluate the devices, starting with two-tone intermodulation distortion (IMD) measurements, conducted in different classes of operation. The third order intermodulation ratio (C/I3) is subsequently calculated and used to compare the transistors fabricated on different designs of thin layers. Example results of two-tone IMD measurements are given in Fig. 2. For further characterization of non-linearities, more advanced system-like digitally modulated signals such as WCDMA signals are to be used.

A comparison of C/I3 plots versus output power for epitaxial structures from Fig. 1 is shown in Fig. 3. The plotted third order intermodulation ratios were calculated from IMD measurements conducted in class-A on 2 x 125 µm wide transistors. In a broad range of output power the transistors fabricated on structure b) dem-

Die auf Struktur b) hergestellten Transistoren zeigen für weite Bereiche der Ausgangsleistung ein höheres C/I3-Verhältnis. Diese Steigerung des C/I3-Verhältnisses ist auf eine bessere Fokussierung der Elektronen im zweidimensionalen Elektronengas aufgrund der AlGaIn-Barriere im Puffer zurückzuführen. Daher ist diese Struktur für weitere Untersuchungen interessant.

Das IMD-Verhalten kann auch aus den gemessenen DC-Transferkennlinien (Drainstrom vs. Gatespannung bei fester Drainspannung) vorausgesagt werden. Die Leistung jeder Signalkomponente im Spektrum kann durch die Taylor-Koeffizienten der Transferkennlinie ausgedrückt werden. Das Verhältnis von Trägerleistung zur Leistung bei der dritten Harmonischen (C/I3) hängt vom Verlauf der Steilheit ( $g_m$ ) in Abhängigkeit von der Gatespannung ab, die ihrerseits durch die verwendete epitaktische Struktur bestimmt wird. Alternativ kann auch die Zeitbereichs-Signalanalyse unter Verwendung der gemessenen Transferkennlinien als Input zur Analyse der IMD verwendet werden.

Beide Ansätze bieten eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Messungen. Allerdings basieren beide Analysen auf Gleichstrom-Transferkennlinien und berücksichtigen keine dynamischen Effekte. Um IMD-Effekte im Sinne einer späteren Designoptimierung besser verstehen zu können sind komplexere Modelle nötig, welche zusätzlich nicht-lineare Elemente wie Kapazitäten ( $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ) und den Sourcewiderstand berücksichtigen.

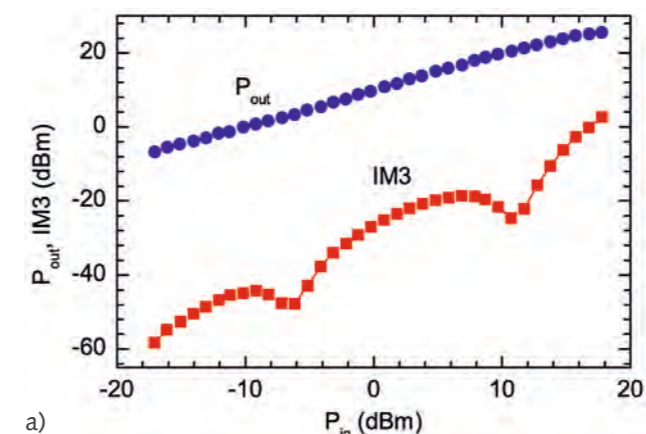


Abb. 2: Beispielresultate der Zweiton-IMD-Messungen.  
Fig. 2: Example results of two-tone IMD measurements.

onstrate a higher C/I3 ratio. This increase in C/I3 ratio can be explained by a better confinement of 2DEG due to the presence of an AlGaIn back barrier. The particular structure therefore is interesting for further characterization.

The IMD behavior is also predicted from the measured static transfer function (drain current versus gate voltage for constant drain voltage). The power of each tone in the spectra can be expressed in terms of Taylor series expansion coefficients of the transfer function. The ratio between the tones (C/I3) depends on the specific gate voltage dependency of transconductance ( $g_m$ ), which in turn rides on the epitaxial structure used for fabrication of transistors. Time-domain waveform analysis using the measured transfer functions as input represents an alternative numerical approach to analyze IMD.

Both approaches provide a good qualitative agreement with the results of the measurements. Nevertheless, these analyses are based on the static transfer functions and do not take dynamic effects into account. More complex models considering all non-linear elements such as capacitances ( $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ) and source resistance ( $R_s$ ) are necessary and provide a better insight for subsequent CAD design.

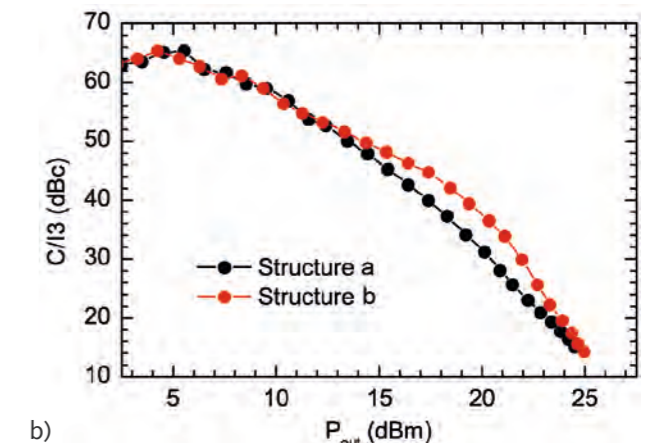


Abb. 3: C/I3 vs. Ausgangsleistung für Transistoren mit verschiedenen epitaktischen Strukturen.  
Fig. 3: C/I3 plot versus output power for transistors fabricated on different epitaxial structures.

## Veröffentlichungen // Publications

E. Bahat-Treidel, I. Khalil, O. Hilt, J. Würfl, G. Tränkle, „Engineering linearity of GaN-based HEMTs power devices by tailoring transfer characteristics“, Phys. Status Solidi C 6, No. 6, 1378-1381 (2009).

I. Khalil, E. Bahat-Treidel, F. Schnieder, J. Würfl, „Improving the Linearity of GaN HEMTs by Optimizing Epitaxial Structure“, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 56, No 3, 361-364 (2009).

## QUALIFIZIERUNG VON GAN-HEMT-EPI-WAFERN DURCH STABILE UND REPRODUZIERBARE HERSTELLUNG VON BAUELEMENTEN

Das FBH wurde von der Europäischen Weltraumagentur ESA ausgewählt, den europäischen Entwicklungsstand der GaN-Epitaxie für Mikrowellen-Bauelemente mit dem weltweiten Status dieser Technologie zu vergleichen. Für die Untersuchung im Rahmen des GaN-HEMT-Benchmarking-Projektes wurden GaN-HEMT-Wafer bei neun Epitaxie-Lieferanten weltweit erworben. Zunächst wurden die Parameter der Epitaxie-Schichten und somit die Materialqualitäten der Wafer aufwändig mit geeigneten, nicht-zerstörerischen Methoden vermessen und verglichen. Die Qualität eines Wafers kann jedoch nur anhand der auf diesem Wafer hergestellten Bauelemente beurteilt werden. Daher musste zunächst ein stabiler Herstellungsprozess für GaN-HEMTs am FBH etabliert werden.

Dieser Prozess muss möglichst unempfindlich gegenüber Variationen der Waferqualität sein. Abb. 1 zeigt am Beispiel der Waferverbiegung starke Qualitätsunterschiede in der Vergleichsgruppe. Wenn sich die Wafer stark verbiegen, erschwert dies die Lithografie kleiner Strukturen und reduziert die Ausbeute an Bauelementen. Mit der am FBH installierten und optimierten Haltevorrichtung in der Stepper-Belichtungsanlage konnte die Verbiegung der Wafer jedoch weitgehend reduziert werden. Ferner sollte die Prozessierung die intrinsischen Materialeigenschaften der Wafer so wenig wie möglich beeinflussen. Daher wurde im Laufe des Projektes entschieden, für den wichtigsten Prozessschritt – die Herstellung der winzigen, nur 250 nm langen Steuerelektroden (Gates) – eine industriereprobte T-Gate-Technologie in Kooperation mit UMS zu nutzen.

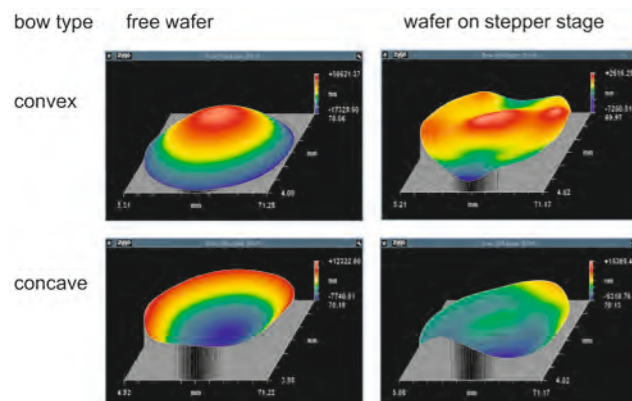


Abb. 1: Beispiele für extreme Verbiegung von GaN-HEMT-Wafern und die Reduktion der Verbiegung durch Ansaugen des Wafers auf der Arbeitsplatte einer Lithographieanlage.

Fig. 1: Effect of vacuum chuck on convex or concave bowed AlGaIn/GaN-HFET wafers.

## BENCHMARKING OF GAN HEMT EPI WAFERS USING STABLE AND REPRODUCIBLE DEVICE PROCESSING

FBH has been selected by the European Space Agency (ESA) to perform a challenging research project on benchmarking epitaxial qualities of GaN-HEMT wafers. The project goal was to compare the technology levels achieved in Europe with the world-wide status in this field. Therefore FBH acquired wafers with a defined epi structure from 9 vendors world-wide. First of all, extensive non-destructive material characterizations were done on each wafer in order to compare the epitaxial layer properties. However, a meaningful qualification of an epi wafer can only be obtained from active devices manufactured on these wafers. Thus, a stable and robust device processing technology had to be established at FBH.

This processing should be non-sensitive against variations in wafer qualities. Fig. 1 shows by means of wafer warp the strong quality differences within the test wafer group. A strongly bowed wafer makes the lithography of tiny structures difficult and thus reduces the device yield. However, using an optimized wafer stage which has been installed at FBH, the wafer bow in the lithography system (stepper) can be significantly reduced. Furthermore, the processing impact on intrinsic material properties of a wafer should be limited as far as possible. Therefore, it was decided during the project to use a well-established T-gate technology in cooperation with UMS for the most challenging processing step, the fabrication of tiny 250 nm long gates. Based on the optimized processing modules, the wafers were stable and reproducibly fabricated in two subsequent processing runs, thus working out a reliable wafer comparison.

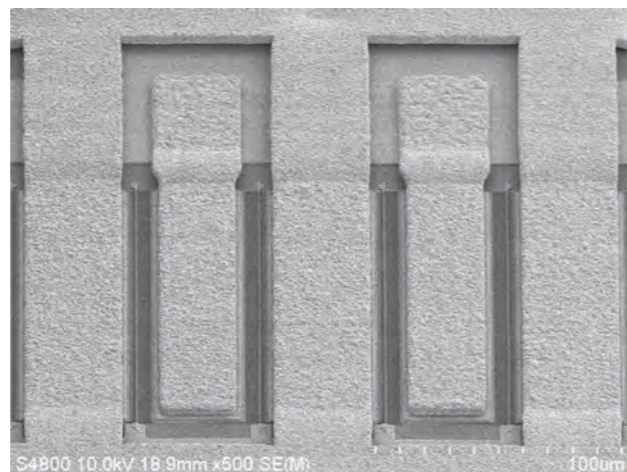


Abb. 2: Detailansicht fertig prozessierter GaN-HEMT-Transistoren im Rasterelektronenmikroskop.

Fig. 2: Detailed view of GaN-HEMT transistors (scanning electron microscope).

Durch die optimierten Prozessmodule konnten die Wafer in zwei nachfolgenden Prozessläufen stabil und reproduzierbar hergestellt werden und erlaubten daher einen qualitativ hochwertigen Vergleich untereinander.

Abb. 2 zeigt die fertigen GaN-HEMT-Transistoren auf einem Wafer. Die Steilheit der Transistoren jeweils für ein Waferpaar eines Herstellers ist ein Beispiel für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, siehe Abb. 3. Zunächst ist festzustellen, dass die Hersteller deutlich unterschiedliche Steilheitswerte erreichen. Die Steilheit reagiert empfindlich auf Variationen in Qualität und Dimensionierung der Epitaxieschichten. Darüber hinaus werden weitere technologische Details sichtbar: So unterscheiden sich beispielsweise zwei Epitaxieläufe von Hersteller 3 in der Homogenität der Werte auf dem Wafer. Auf der Grundlage des optimierten Bauelement-Prozesses konnte das Projektziel des Hersteller-Benchmarkings erreicht werden. Da der Prozess die unterschiedlichen Waferqualitäten reproduzierbar abbildet, wurde ein faires Ranking der Epitaxie-Lieferanten erarbeitet.

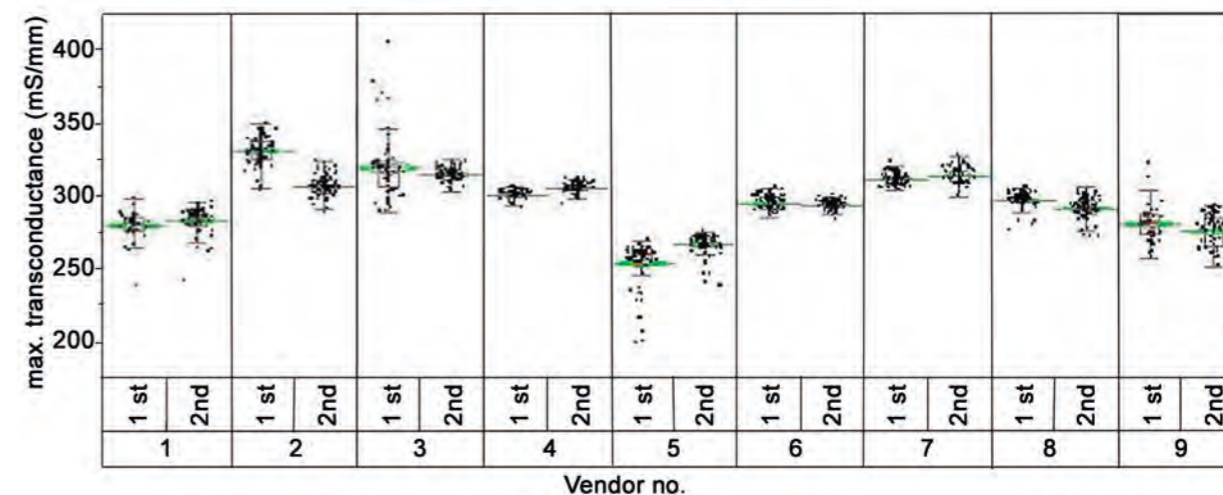


Abb. 3: Steilheitswerte von jeweils 148 Transistoren des Typs  $2 \times 50 \mu\text{m}$  AlGaIn/GaN-HFET gemessen auf Waferpaaren (1<sup>st</sup> / 2<sup>nd</sup>: Wafer prozessiert im ersten bzw. zweiten Durchlauf) verschiedener Hersteller (vendor no. 1...9).

Fig. 3: Maximum transconductance of  $2 \times 50 \mu\text{m}$  AlGaIn/GaN HFET measured on pairs of wafers (1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> wafer) from 9 different vendors (vendors 1...9) processed in two subsequent runs (mappings of 148 transistors each per wafer).

Fig. 2 shows fabricated GaN-HEMT transistors on a wafer. The transistor's transconductances for one pair of wafers from each vendor are taken as an example for the reproducibility of the results as depicted in Fig. 3. Firstly, significant differences between the vendors were determined when the achieved maximum transconductance values were compared. The transconductance reacts very sensitive on variations of epitaxial layer quality and dimensions. Additionally, further technological details are visible: different wafer uniformities for different epitaxial runs are observed, e.g. for vendor 3. Based on the optimized device processing the project goal of vendor benchmarking was achieved. The processing provided reliable information on differences in wafer qualities, thus giving a fair ranking of epitaxial vendors.

## Veröffentlichungen // Publications

P. Kurpas, J. Würfl, A. Barnes, „Status of AlGaIn/GaN HEMT epitaxial wafer benchmarking“, Space agency-mod workshop on GaN microwave component technologies, Ulm, Germany, (2009).

P. Kurpas, I. Selvanathan, M. Schulz, H. Sahin, P. Ivo, M. Matalla, J. Splettstoesser, A. Barnes, J. Würfl, „Stable and reproducible AlGaIn/GaN HFET processing highly tolerant for epitaxial quality variations“, CS MANTECH Technical Digest, session S 9. Accepted for publication (2010).

## SELBSTSPERRENDE GAN-TRANSISTOREN FÜR LEISTUNGSSCHALTER

Wegen der Kombination aus geringem Einschaltwiderstand und hoher Durchbruchfeldstärke sind AlGaIn/GaN-HEMTs ideale Schalttransistoren für Leistungskonverter. Mit ihnen können geringe Leitungs- und Schaltverluste realisiert werden. Aus Sicherheitsgründen müssen Schalttransistoren für Leistungsanwendungen komplett ausgeschaltet sein, wenn die Kontrollelektrode spannungslos ist, dies erfordert selbstsperrende Transistoren. Im Gegensatz dazu sind GaN-HEMTs von Natur aus selbstleitend. Die am FBH entwickelte selbstsperrende p-GaN Gate-Technologie weist sowohl geringe Leckströme für den ausgeschalteten Transistor (0 V Gatespannung) als auch hohe Ströme und einen geringen Widerstand für den eingeschalteten GaN-Transistor auf. Auch die Gateströme bleiben marginal. Die selbstsperrende FBH-GaN-Transistortechnologie wurde für Flip-Chip-Montage mit PbSn-Lötbumbs optimiert, siehe Abb. 1.

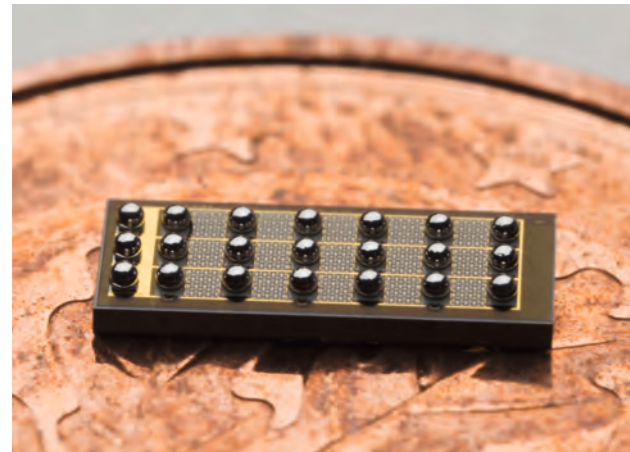


Abb. 1: Selbstsperrender 20 A / 200 V GaN-Transistor in p-GaN Gate-Technologie, auf einer 1-Cent-Münze.

Fig. 1: 20 A / 200 V normally-off GaN transistor in p-GaN Gate technology, positioned on a 1 cent coin.

Durch die in Abb. 2 gezeigten Mediane der Transferkennlinie und des Gatestroms für 105 Transistorzellen eines 3"-Wafers mit je 3,8 mm Gateweite wird das DC-Schaltverhalten verdeutlicht. Der in Abb. 1 gezeigte 20 A Transistor besteht aus 15 derartigen Zellen. Das Transistorverhalten über den Wafer ist sehr einheitlich. Die Schwellspannung  $V_{th}$  beträgt +1,25 V. Die Bauteile weisen mit über fünf Größenordnungen eine sehr hohe Dynamik des Drainstroms bei zugleich sehr niedrigem Gateleckstrom auf. Im eingeschalteten Zustand bei  $V_{GS} = +5$  V steigt der Drainstrom auf 0,41 A/mm entsprechend 1,5 A pro Transistorzelle an. Der Einschaltwiderstand beträgt dabei 10,9  $\Omega$ mm.

## NORMALLY-OFF GAN TRANSISTORS FOR POWER SWITCHING APPLICATIONS

AlGaIn/GaN HEMTs are ideal switching transistors in power converters due to their low on-state resistance combined with high breakdown strength. They therefore promise low conduction and switching losses. For safety reasons, transistors in power switching-applications have to be completely turned off when the control electrode is unbiased. This requirement calls for normally-off transistor behavior instead of the default normally-on properties of standard GaN HEMTs. The normally-off p-GaN Gate technology developed at FBH combines low leakage currents for the unbiased gate (0 V) in the off-state with high currents and low resistances in the on-state. Additionally, the gate current remains small. FBH's normally-off transistors are optimized for flip-chip mounting technique using PbSn solder bumps as shown in Fig. 1.

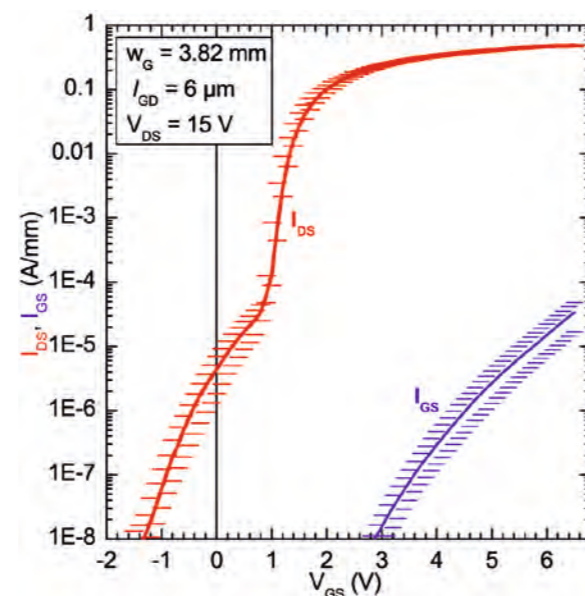


Abb. 2: Transferkennlinie (rot) und Gatestrom (blau); Median (25% und 75% Perzentilen als Striche) für 3,8 mm weite Transistoren  $I_{GD} = 6 \mu\text{m}$  eines 3"-Wafers.

Fig. 2: Transfer characteristic (red) and gate current (blue), median (25% and 75% percentiles as bars) for 3.8 mm wide devices with  $I_{GD} = 6 \mu\text{m}$  on a 3" wafer.

Fig. 2 demonstrates the DC-switching properties of these devices by showing the median of transfer characteristics and gate current for 105 basic device cells with 3.8 mm gate width over a 3" wafer. Very uniform device performance across the wafer has been obtained. The 20 A transistor shown in Fig. 1 consists of 15 suchlike cells. The threshold voltage is  $V_{th} = +1.25$  V. The devices are demonstrating a very high dynamic range of drain current over more than five orders of magnitude while maintaining a very low gate leakage current. For on-state condition at  $V_{GS} = +5$  V the drain current piles up to 0.41 A/mm respectively 1.5 A absolute, the on-state resistance  $R_{ON}$  is 10.9  $\Omega$ mm in this case.

Die gemäß Abb. 3 mit dem Gate-Drainabstand  $I_{GD}$  skalierende Durchbruchstärke  $V_{Br}$  der Transistoren ist Ergebnis einer gezielten Epitaxie- und Bauelementoptimierung. Dabei wurden 870 V Durchbruchspannung für  $I_{GD} = 18 \mu\text{m}$  erzielt. Da mit zunehmendem Gate-Drainabstand auch der Einschaltwiderstand ( $R_{ON}$ ) ansteigt, muss beim Leistungstransistorentwurf immer zwischen einem niedrigen (flächenspezifischen)  $R_{ON}$  und einem hohen  $V_{Br}$  abgewogen werden. Ein Auftragen von  $R_{ON} \times A$  über  $V_{Br}$  in Abb. 4 zeigt die Bewertung der FBH-Transistoren unterschiedlicher Gate-Drainabstände gegenüber selbstsperrenden GaN-Transistoren anderer Arbeitsgruppen. Mit  $R_{ON} \times A = 3,52 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  und  $V_{Br} = 870$  V wird eine Position innerhalb der weltbesten selbstsperrenden GaN-Transistoren erreicht und das  $V_{Br}$ -zu- $R_{ON}$ -Verhältnis von Si-basierten Transistoren deutlich übertroffen.

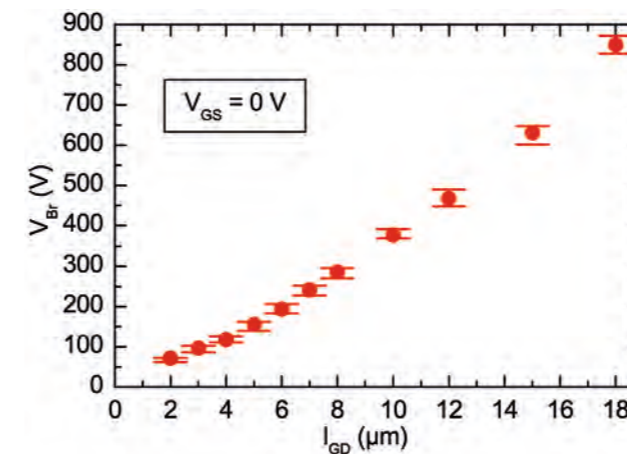


Abb. 3: Durchbruchspannungsskalierung (Median, 25% und 75% Perzentilen) für Gate-Drainabstände zwischen 2 und 18  $\mu\text{m}$ . 0,25 mm Gateweite,  $V_{GS} = 0$  V.

Fig. 3: Breakdown voltage (median, 25% and 75% percentiles) scaling for different gate-drain spacings. 0.25 mm gate width and  $V_{GS} = 0$  V.

The obtained breakdown strength  $V_{Br}$  of the devices is a result of careful epitaxy and device optimization. According to Fig. 3 it scales with the distance between the gate and drain  $I_{GD}$ . A device breakdown at 870 V could be realized for a gate-drain separation of 18  $\mu\text{m}$ . However, with increased gate-drain distance the on-state resistance increases at the same time. Power switching transistor designs are thus facing a trade-off between low (area-specific)  $R_{ON}$  and high  $V_{Br}$ . Fig. 4 benchmarks FBH devices with scaled gate-drain separations compared to other reported normally-off GaN transistors by utilizing a  $R_{ON} \times A$  vs.  $V_{Br}$  plot. Top performance is demonstrated with  $R_{ON} \times A = 3.52 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  and  $V_{Br} = 870$  V. The  $V_{Br}$ -to- $R_{ON}$  ratio surpasses the performance of silicon-based devices and ranks among the best normally-off GaN devices world-wide.

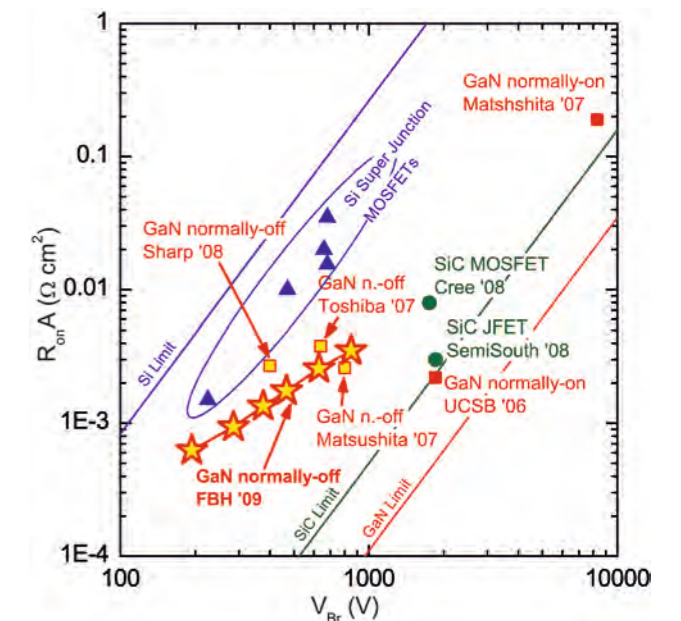
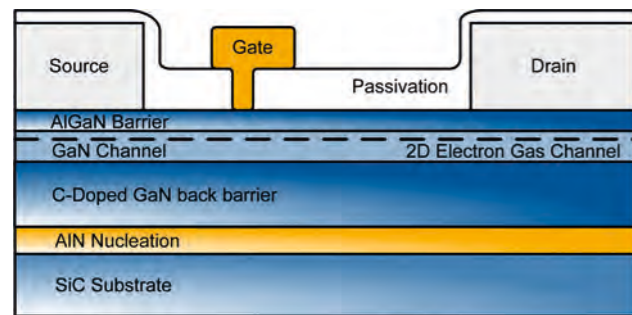


Abb. 4: Spezifischer Einschaltwiderstand über Durchbruchspannung für selbstsperrende und selbstleitende GaN-Transistoren. Die Sterne repräsentieren 0,25 mm weite FBH-Transistoren.  $V_{Br}$  und  $R_{ON} \times A$  steigen mit zunehmendem Gate-Drainabstand von 6, 8, 10, 12, 15 und 18  $\mu\text{m}$  an.

Fig. 4: Specific on-state resistance vs. breakdown voltage for normally-off and normally-on GaN transistors. The stars represent FBH transistors with 0.25 mm gate width. The gate-drain spacings were 6, 8, 10, 12, 15 and 18  $\mu\text{m}$  with increasing  $V_{Br}$ .

## ERHÖHUNG DER DURCHBRUCHSPANNUNG IN GAN-BASIERTEN HEMTS

Die Schaltleistung von AlGaIn/GaN-HEMTs ist hauptsächlich begrenzt durch Leitungsverluste im eingeschalteten Zustand ( $R_{ON}$ ) und durch die Durchbruchspannung im ausgeschalteten Zustand ( $V_{BR}$ ). In vielen Fällen ist die Durchbruchspannung von GaN-basierten HEMTs durch steigenden Drainstrom im Sperrbereich bei zunehmender Drainspannung bestimmt. Dabei dominieren zwei Typen von Leckströmen: Bufferleckstrom (Punch-Through) und Gateleckstrom. Wenn diese Leckströme mit technologischen Maßnahmen unterdrückt werden, steigt die Durchbruchspannung. Dazu wurden AlGaIn/GaN-HEMTs mit kohlenstoffdotiertem, nichtleitendem (SI)-GaN-Buffer sowie Double-Heterojunction (DH)-HEMTs mit Multiple-Grating-Field-Plates (MGFPs) untersucht.



a)

Abb. 1: Planar-Gate GaN-HEMT-Struktur mit a) kohlenstoffdotierter Rückseitenbarriere und b) DH-HEMT-Struktur mit MGFPs.

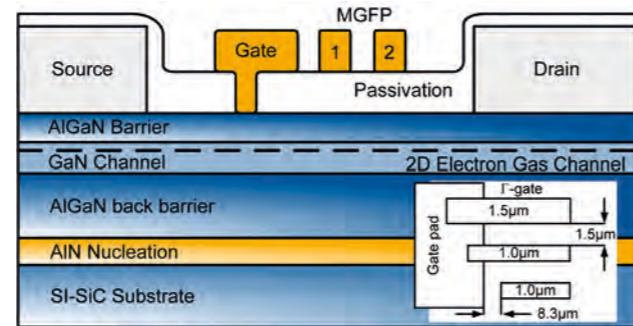
Fig. 1: Planar gate GaN-HEMT structure with a) carbon-doped GaN back barrier and b) DH-HEMT structure with MGFPs.

Kohlenstoff ist ein Akzeptor mit energetisch tief liegenden Niveaus und kompensiert eventuelle Donatoren im GaN-Buffer. DH-Schichten unterdrücken die Leckströme im Sperrbereich und erhöhen so die Durchbruchspannung. Da der Durchbruch des Bauelements nun nicht mehr durch den Punch-Through-Effekt dominiert ist, skaliert die Durchbruchspannung mit dem Gate-Drain-Abstand. Dennoch bleibt der Leckstrom durch das Gate ein limitierender Faktor. Abb.1 zeigt den schematischen Querschnitt der HEMTs. Die Strukturen wurden mithilfe von MOVPE auf SI- und n-type SiC-Substraten hergestellt. Abb. 2 zeigt eine "On-Wafer"-Leckstrommessung für Wafer mit kohlenstoffdotiertem Buffer auf SI-SiC-Substrat (entspr. Abb. 1a) in Abhängigkeit des Gate-Drain-Abstands.

Die Ergebnisse demonstrieren einen sehr niedrigen Leckstrom von  $\sim 10^{-7}$  A/mm und zeigen eine gute Skalierung der Durchbruchspannung mit zunehmendem Gate-Drain-Abstand. Obwohl die Durchbruchspannung erheblich gesteigert werden konnte, ist der Kompromiss beim spezifischen Einschaltwiderstand  $R_{ON} \times A$  sehr gering. Die Einführung des Kohlenstoffbuffers als Rückseitenbarriere fügt nur eine kleine Zusatzkomponente zum  $R_{ON}$  hinzu. Die Messungen zeigen, dass auch bei DH-HEMTs eine Verringerung der Leckströme und eine Verbesserung der

## BREAKDOWN-VOLTAGE ENHANCEMENT IN GAN-BASED HEMTS

AlGaIn/GaN HEMTs' power switching performance is mainly limited by conduction losses in the on-state resistance ( $R_{ON}$ ) and the off-state breakdown voltage ( $V_{BR}$ ). In many cases the breakdown of a GaN-based HEMT is determined by the increase of subthreshold drain current with increasing drain voltage. This current is mostly dominated by two leakage currents: the bulk punch-through and the Schottky-gate reverse bias tunneling leakage current. Any suppression of these subthreshold leakage currents by technological means enhances device  $V_{BR}$ . AlGaIn/GaN HEMTs utilizing carbon-rich semi-insulating (SI-) GaN buffer and Double-Heterojunction (DH) HEMTs with integrated single-layer Multiple Grating Field Plates (MGFPs) were investigated.



b)

Carbon is a deep level acceptor and acts as a source of compensation for unintentional donors in the GaN buffer. DH layers suppress these subthreshold current leakages and therefore enhance the device  $V_{BR}$ . Since device breakdown is no longer dominated by punch-through this leads to a scaling of breakdown voltage with gate-drain distance. However, the gate subthreshold leakage current remains the bottleneck. Fig. 1 illustrates the schematic cross-section of the fabricated HEMTs. The samples were grown by MOVPE on SI-SiC substrates and n-type SiC substrates. Fig. 2 shows wafer level measurements of subthreshold drain-leakage current for wafers with C-doped buffer on SI-SiC substrate (according to Fig. 1 a) dependent on the gate-drain distance.

The results show a very low background subthreshold drain-leakage current of  $\sim 10^{-7}$  A/mm and a nice scaling of breakdown voltage with increasing gate-drain separation. While demonstrating an enormous improvement in the  $V_{BR}$ , the penalty in the specific on-state resistance,  $R_{ON} \times A$ , is minimal. The introduction of carbon into the device buffer as back barrier adds only a very small component to the on-state resistance. Measurements show a suppression of the subthreshold drain-leakage current for the DH HEMTs and an improvement in the device  $V_{BR}$  characteristic. Fig. 3 highlights the impact of MGFPs on

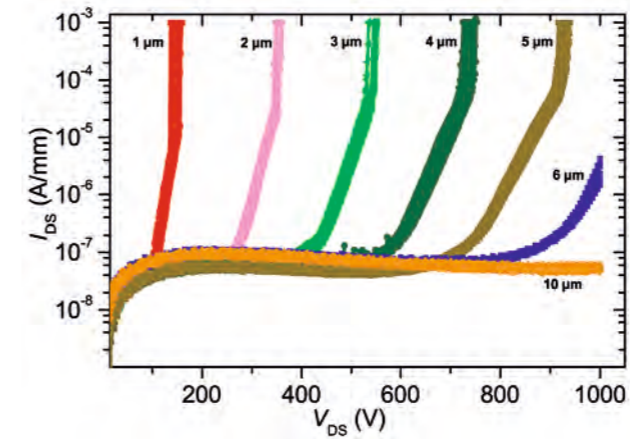


Abb. 2: Drainstrom unterhalb der Transistorschwelle in Abhängigkeit von der Drainspannung für GaN-HEMTs mit GaN:C-Buffer auf SI-SiC-Substrat bei verschiedenen Gate-Drain-Abständen.

Fig. 2: Subthreshold drain current in dependence on drain voltage with GaN:C buffer on SI-SiC substrate with different gate-drain spacing.

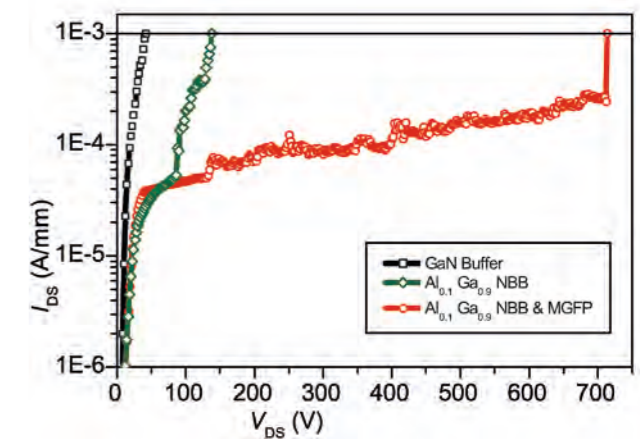


Abb. 3: Verlauf des Drainstroms  $I_{DS}$  unterhalb der Transistorschwelle ( $V_{GS} = -7$  V,  $L_{CD} = 10$   $\mu$ m) als Funktion der Drainspannung. In Abhängigkeit von Bufferdesign und der Präsenz von Feldplatten (MGFP).

Fig. 3: Subthreshold drain current  $I_{DS}$  as a function of drain current ( $V_{GS} = -7$  V,  $L_{CD} = 10$   $\mu$ m) in dependence on buffer design and the presence of field plates (MGFP).

Durchbruchspannung erreicht wird. Abb. 3 verdeutlicht anhand von Bauelementen auf Wafern mit AlGaIn-Back-barrier-Design den Einfluss der MGFP auf das Leckstromverhalten unterhalb der Transistorschwelle. Die Integration von MGFPs an DH-HEMT-Bauelementen bewirkt eine drastische Verringerung der Leckströme und damit eine Erhöhung der Durchbruchspannung. Diese Ergebnisse werden in Abb. 4. eingeordnet. Anhand des Parameterraums spezifischer Einschaltwiderstände ( $R_{ON} \times A$ ) vs. Durchbruchspannung ( $V_{BR}$ ) werden die am FBH erreichten Ergebnisse mit Resultaten auf internationaler Ebene verglichen. Die punktierte Linie zeigt den Verlauf von  $R_{ON} \times A$  mit zunehmender Größe des Bauelements. Dies zeigt, dass die am FBH hergestellten GaN-Leistungsbau-elemente zu den weltweit besten Bauelementen dieser Art zählen.

subthreshold properties of devices fabricated on wafers with AlGaIn back barrier designs. For comparison, the properties of devices fabricated on wafers with standard GaN buffers are also shown. A drastic suppression of the subthreshold drain-leakage current and thus an increase in breakdown voltage was observed when MGFPs were integrated in the DH-HEMT devices. For international benchmarking, the specific on-state resistances,  $R_{ON} \times A$ , versus breakdown voltage  $V_{BR}$  are compared in Fig. 4. The dotted line represents the trend of  $R_{ON} \times A$  with increasing device dimensions. In conclusion, Fig. 4 shows that FBH GaN power devices are among the best performing devices world-wide.

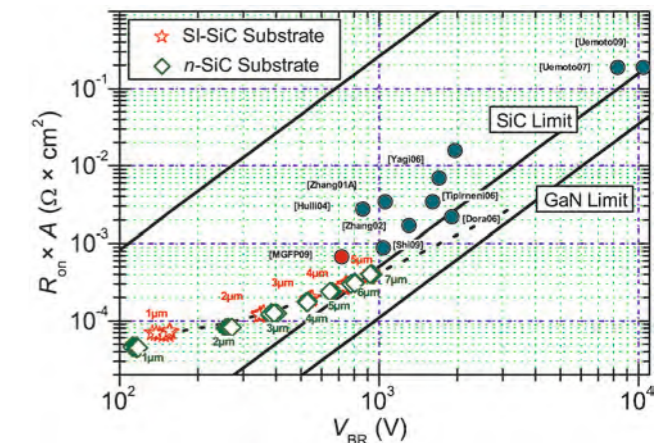


Abb. 4: Vergleich der am FBH hergestellten DH-HEMTs mit GaN:C-Rückseitenbarriere mit dem weltweiten State-of-the-Art anhand des  $V_{BR}$  vs.  $R_{ON} \times A$ -Diagramms.

Fig. 4: Benchmarking of fabricated DH HEMTs with GaN:C back barrier versus the world-wide state-of-the-art using the  $V_{BR}$  vs.  $R_{ON} \times A$  diagram.

## Veröffentlichungen // Publications

E. Bahat-Treidel, O. Hilt, F. Brunner, V. Sidorov, J. Würfl, G. Tränkle, „AlGaIn/GaN/AlGaIn DH HEMTs breakdown voltage enhancement using Multiple Grating Field Plates (MGFPs)” Electron Devices, IEEE Transactions on, accepted for publication (2010).

E. Bahat-Treidel, F. Brunner, O. Hilt, E. Cho, J. Würfl, G. Tränkle, „AlGaIn/GaN/GaN:C back-barrier HFETs with breakdown voltage of over 1 kV and low  $R_{ON} \times A$ ” Electron Devices, IEEE Transactions on, submitted for publication (2010).



## THERMISCH OPTIMIERTE 2D-SKALIERUNG VON GAN-LEISTUNGSTRANSISTOREN

GaN-HEMTs kombinieren hohe Durchbruchfestigkeit mit einem niedrigen Einschaltwiderstand. Sie eignen sich daher hervorragend für Anwendungen in der Leistungselektronik bei niedrigeren Frequenzen unterhalb 100 MHz, beispielsweise in effizienten Schaltnetzteilen, Motorantrieben und technischen Hochfrequenzgeneratoren. Da bei diesen Frequenzen die Wellenlängen wesentlich größer als die Chipabmessung sind, kann die Skalierung zu größeren Bauelementen in zwei Dimensionen erfolgen. Wertvolle Chipfläche wird eingespart, da das in der Mikrowellentechnik eingesetzte klassische "Powerbar Design" nicht mehr notwendig ist.

Ein optimales Design für GaN-Leistungs-Schalttransistoren ermöglicht eine hohe Leistungsdichte pro Fläche bei einem ausgewogenem Temperaturprofil. Der flächige Aufbau der Transistoren erfolgt, indem Transistorzellen im Schachbrettmuster angeordnet und die einzelnen Transistoren in einer on-Chip-Verdrahtungsebene mit BCB als Isolator kontaktiert werden (Abb. 1a). Die Transistorzellen selbst werden über Bumps in Flip-Chip-Technik mit einer darunter liegenden Leiterplatte, z.B. aus AlN, verbunden. Da mittels Flip-Chip-Technologie die Hochstrom-Verdrahtungsebenen auf die Leiterplattenseite verlegt werden können, wird eine sehr gleichmäßige Stromversorgung der Transistorzellen erreicht.

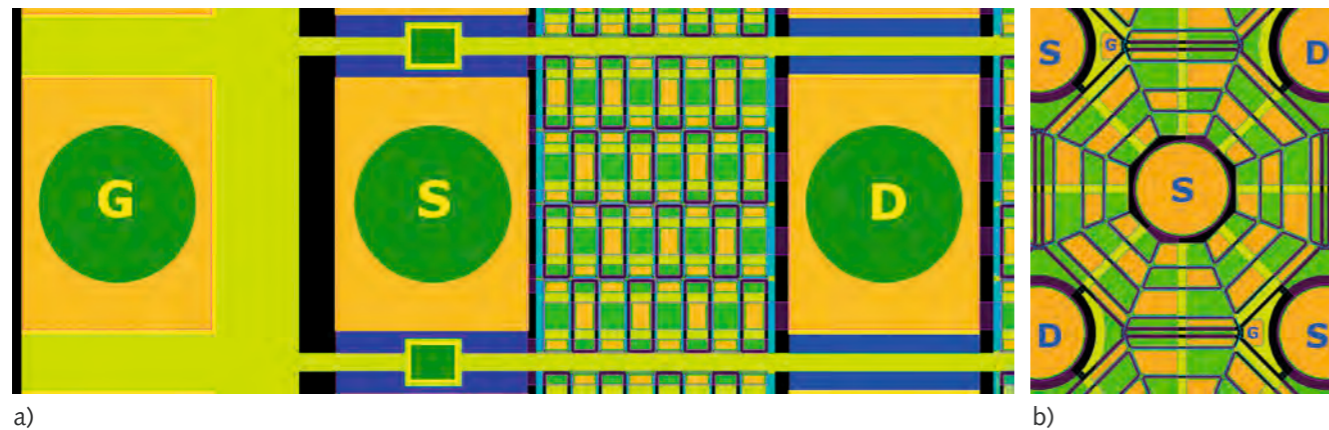


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau der Leistungstransistorzellen in Bump-Technologie, a) Schachbrettmuster, b) Oktagondesign.  
Fig. 1: Basic design of transistor cells in bump technology, a) checker board array, b) octagonal design.

In Verbindung mit der Flip-Chip-Montagetechnik müssen das Design des Chips, der Bumps und der Leiterplatte optimiert und aufeinander abgestimmt sein. Es soll eine möglichst große Wärmemenge über die Bumps abgeführt werden und Wärmespitzen auf den Chips sollen vermieden werden. Der Wärmetransport über die Bumps skaliert mit deren Wärmeleitfähigkeit. Daher sind beispielsweise Cu-Bumps den Standard-PbSn-Bumps vorzuziehen.

## THERMAL OPTIMIZATION BY 2D SCALING OF GAN POWER TRANSISTORS

GaN HEMTs combine high breakdown voltage with low on-state resistance. Therefore they fit perfectly to the requirements of power electronic devices for frequencies below 100 MHz, for example for efficient power supplies, motor drivers and technical high-frequency generators. Due to the fact that the signal wavelength at these frequencies is considerably larger than the chip dimensions, the devices can be scaled to larger entities by two dimensions. The classical power bar design commonly used for microwave devices is not necessary and thus valuable chip area is saved.

GaN power transistor design optimization aims to increase the power density per area while the temperature distribution stays balanced. Placing of transistor cells in checker arrays and contacting the individual transistors by a wiring level in connection with BCB allows 2D scaling to larger transistors as shown in Fig. 1a. The transistor cells themselves are connected using bump technology and flip-chip mounting on a printed circuit board with similar thermal expansion coefficient as the chip, e.g. AlN. Since flip-chip mounting shifts any high current wiring to the printed circuit board level, this method enables a very homogenous current supply of the individual power cells.

In connection with flip-chip mounting, the thermal design of the power device, bumps and PCB have to be optimized and adjusted in order to get as much heat as possible transferred through the flip-chip bumps and to minimize hot spots on the chip. The thermal transport across the bumps scales with their thermal conductivity. Therefore Cu bumps are in favor of standard PbSn bumps.

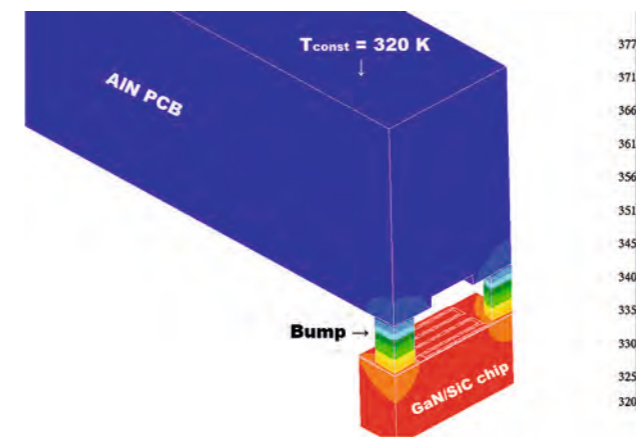


Abb. 2: 3D-Simulation der Temperaturverteilung in Transistorzellen im Schachbrettmuster.  
Fig. 2: 3D simulation of the heat distribution in transistor cells (checker board array).

Abb. 2 zeigt eine 3D-Simulation der Temperaturverteilung in den Transistorzellen, die über seitlich angeordnete, hoch wärmeleitfähige Cu-Bumps auf eine AlN-Leiterplatte entwärmt werden. Bei der Nennstromdichte der Transistorzellen von 1/3 des maximalen Drainstrom beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Transistorkanal und Leiterplatte 57 K. Im Vergleich zur klassischen Montage auf der Wärmesenke ( $\Delta T = 22$  K) ist für dieses Design der Wert um den Faktor 2,6 höher. Er kann jedoch durch ein entsprechend optimiertes Design weiter reduziert werden. Eine weitere deutliche Verbesserung wird durch eine thermisch optimierte Anordnung der aktiven Transistorflächen zu den die Wärme abführenden Bumps erreicht. In diesem Zusammenhang ermöglicht das in Abb. 1b) und 3) präsentierte achteckige Transistor-Design (Oktagon-Design) eine quasi-konzentrische, abstandsoptimierte Anordnung der Transistorzellen zu den Bumps und somit eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und bessere Wärmeableitung. Die Simulationen zeigen, dass sich der damit erreichbare Wärmewiderstand im Vergleich zum vorhergehenden Design (Anordnung im Schachbrettmuster) um 30% verbessert und sich von der Standard-Montagetechnik nur noch um den Faktor 1,8 unterscheidet.

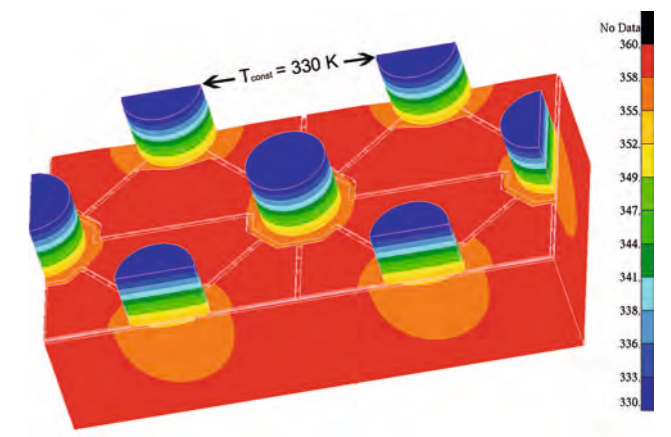


Abb. 3: 3D-Simulation der Temperaturverteilung in Transistorzellen im Oktagon-Design.  
Fig. 3: 3D simulation of heat distribution in transistor cells (octagonal design).

Fig. 2 shows a 3D simulation of the heat distribution in transistor cells with Cu flip-chip bumps providing high thermal conductivity, which are placed outside of the active transistor area and connected to AlN PCB. At an continuous operation current density of the power cells of 1/3 of the maximum possible drain current, the temperature drop between transistor channel and PCB is 57 K. Compared to common backside packaging on heat sinks, the thermal resistance of this design is increased by factor 2.6. The thermally optimized arrangement of active transistor areas to bumps can further improve thermal properties. As shown in Fig. 1b) and 3), an octagonal-shaped quasi-concentric design is grouping transistor cells around bumps in such a way, that the thermal load is equalized as far as possible. Therefore, maximum channel temperature and on-chip hot spots are further reduced. Simulations show, that the octagonal design has improved thermal conductivity by 30% as compared to the rectangular (checker board array) flip-chip design. Compared to standard backside packaging on heat sink, the thermal resistance is increased by a factor of 1.8 only.

**GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG**  
**BUSINESS AREAS & RESEARCH**

## DIODENLASER

Das Ferdinand-Braun-Institut ist eines der weltweit führenden Forschungsinstitute bei der Erforschung und Realisierung von Diodenlasern auf der Basis von Galliumarsenid. Es entwickelt hochbrillante und hoch-effiziente Diodenlaser vom roten bis zum nahen infraroten Spektralbereich (630 nm...1150 nm). Diese sind Schlüsselkomponenten für die optischen Technologien. Die Einsatzgebiete beinhalten Lasersysteme für die Materialbearbeitung und Laser für die Medizintechnik (Desinfektion, photodynamische Krebstherapie) sowie die Unterhaltungstechnologie (Displays) ebenso wie Hochleistungslasersysteme in der Grundlagenforschung (Röntgenlasersysteme, Teilchenbeschleuniger und laserinduzierte Kernfusion). Mit seinen Kompetenzen deckt das FBH den gesamten Teil der Wertschöpfungskette ab: von Simulation und Entwurf der Diodenlaser über die technologische Realisierung bis zum Aufbau einsatzfähiger Diodenlasermodule.

Basierend auf einer maßgeschneiderten Chipentwicklung gewinnt die hybride Integration von aktiven und passiven Bauelementen auf einer mikrooptischen Bank für neuartige kompakte Strahlquellen zunehmend an Bedeutung. Auf diese Weise entstehen benutzerfreundliche Laserstrahlquellen hoher Brillanz. Sie zeichnen sich durch geringe Abmessungen, einen hohen Konversionswirkungsgrad und damit geringen Energieverbrauch aus.

Die Fortschritte im Jahr 2009 manifestieren sich insbesondere in Weiterentwicklungen bei monolithischen, gitterstabilisierten Diodenlasern und bei kompakten Modulen sowohl für die Erzeugung sichtbaren Laserlichtes als auch kurzer energiereicher Lichtimpulse mit Zeitdauern von 5 ps...20 ns mit nahezu beliebigen Folgefrequenzen. So wurden spektral schmalbandige Hochleistungsdiodenlaser mit Ausgangsleistungen von 10 W (100 µm Streifenbreite) und einer Konversionseffizienz > 55% demonstriert. Die hochbrillanten Diodenlaser werden sowohl als Pumplaser für die nächsten Generationen von Festkörper- und Faserlasern dienen als auch bei Hochleistungslasersystemen zum Einsatz kommen, die Wellenlängenmultiplex zur Verbesserung der Strahlqualität ausnützen.

Mittels monolithischer hochbrillanter Diodenlaser (DBR-MOPA-Strukturen) konnte in einem kompakten Modul durch SHG die optische Ausgangsleistung auf mehr als 1 W im grünen und blauen Spektralbereich nach der Frequenzverdopplung gesteigert werden. Bei bezüglich der Wellenlänge hochstabilisierten Lasern, die in der Spektroskopie und optischen Kommunikation eine wichtige Rolle spielen, konnten die Linienbreiten monolithischer Diodenlaser bei der Wellenlänge 1060 nm um den Faktor 2 auf Werte kleiner 100 kHz verringert werden. Damit werden Stabilitäten besser  $1:10^9$  erreicht, die neue Möglichkeiten in der Freiraumkommunikation, insbesondere zwischen den Satelliten im All eröffnen.

## DIODE LASERS

The Ferdinand-Braun-Institut is one of the world-leading research institutes for the development and commercialization of Gallium-Arsenide based diode lasers. The FBH develops high-brilliance, high-efficiency diode lasers from the red to the near infra-red spectral range (630 nm...1150 nm). Such lasers are key components for use in many optical technology applications. Important commercial markets include, for example, laser systems for material processing, lasers for medical applications (disinfection, photodynamic cancer-therapy) and entertainment lasers (displays). Improved high-power laser systems are also required for basic science applications such as x-ray lasers, particle acceleration and laser-induced nuclear fusion. The FBH serves the entire laser development value chain, from simulation and design to fabrication to ready-to-use diode laser modules.

The hybrid integration of active and passive building blocks into novel compact light sources is one area of growing importance, and this depends critically on the development of customized laser chips. The ongoing development of these hybrid systems is leading to a new generation of user-friendly laser sources, that are compact, deliver high-brilliance with high power conversion efficiency and consequently use very little energy.

Technological highlights in 2009 include progress in monolithic grating-stabilized diode lasers and in compact hybrid modules for the generation of short, high-energy pulses with 5 ps - 20 ns at a virtually arbitrary repetition rate. Specifically, when gratings are monolithically integrated into high-power diode lasers (here, with 100 µm stripe widths), 10 W of optical power is produced at a power conversion efficiency of > 55%. These high-brilliance diode lasers support two growing needs, operating firstly as pump sources for the next generation of solid-state and fiber-laser systems, and secondly for use in direct-diode systems, where their narrow, stable linewidth allows wavelength-multiplexing schemes to be used for increased power density and improved beam quality.

Further highlights include the generation of high-power green and blue light for display applications by means of compact hybrid modules. For the first time, more than 1 W of visible light was produced by frequency conversion from high-brilliance DBR-MOPA-structures. In contrast, in many spectroscopy and optical communication applications, high power levels are not critical but highly stable, extremely narrow spectral lines are. Therefore, the FBH developed new monolithic diode laser sources operating at 1060 nm whose spectral linewidth was reduced by factor of two to below 100 kHz. The newly developed narrow linewidth sources operate with a long-term spectral stability of >  $1:10^9$ , and enable new possibilities in, for example, free space communication, especially for data links between satellites.

## LEISTUNG AUF 11 WATT VERDOPPELT: EFFIZIENTE, SPEKTRAL STABILISIERTE HOCHLEISTUNGS-DIODENLASER

Viele Anwendungen im Bereich der Materialbearbeitung erfordern Diodenlaser, die eine möglichst hohe Leistung innerhalb eines schmalen Spektralbereichs ( $< 1$  nm) emittieren. Zu diesen Anwendungen zählt das Pumpen von Gas- oder Festkörperlaser, die sich durch ein schmalbandiges Absorptionsspektrum auszeichnen, wie z. B. Yb:YAG bei 976 nm. Am FBH wurden DFB-Breitstreifenlaser so optimiert, dass sie weltweit erstmalig Dauerstrichleistungen von bis zu 11 W in einem Spektralbereich  $< 1$  nm emittieren; der Konversionswirkungsgrad lag bei bis zu 58% (Abb.1). Dies erschließt neue Anwendungsmöglichkeiten in leistungsstarken Systemen.



Abb. 1: Klein, aber leistungsstark: Diodenlaser aus dem FBH liefern mehr als 10 W Ausgangsleistung innerhalb eines schmalen Spektralbereichs.  
Fig. 1: Small, but high powered: FBH diode lasers deliver more than 10 W in a narrow spectral line.

Breitstreifendiodenlaser mit integriertem Gitter sind eine kostengünstige Option für Laserstrahlquellen mit hoher optischer Leistung und schmalen Spektrum. Voraussetzung ist jedoch, dass durch die Integration des Gitters die optische Ausgangsleistung und der Konversionswirkungsgrad nicht verringert werden. Abb. 2 zeigt das Schema eines solchen DFB-BA-Diodenlasers, bei dem ein nanostrukturiertes Gitter in den Wellenleiter integriert ist, um im Resonator eine wellenlängenselektive Rückkopplung zu erhalten. Die Herstellung erfolgt in drei Stufen: Zuerst werden die erforderlichen Halbleiterschichten bis zur gewünschten Position des Gitters epitaktisch abgeschieden. Anschließend wird das Gitter mit lithografischen Techniken strukturiert und geätzt. Die noch fehlenden Halbleiterschichten werden in der Epitaxieanlage abschließend aufgewachsen. Der fertige Wafer wird nun so prozessiert, dass einzelne Diodenlaser und Dioden-

## POWER DOUBLED TO 11 WATT: EFFICIENT HIGH-POWER DIODE LASERS WITH BUILT-IN NANO-STRUCTURED GRATINGS

Many material processing applications would benefit from diode lasers that emitted the maximum possible optical power within a narrow, stable spectral line of  $< 1$  nm. Examples include the pumping of narrow absorption lines in solid state or gas lasers, for example Yb:YAG at 976 nm. At the FBH, DFB-BA diode lasers have been optimized so that they operate with a peak conversion efficiency of 58%, and deliver peak continuous wave optical output powers of 11 W within a narrow spectral linewidth of  $< 1$  nm. This is the first time worldwide that diode lasers with integrated gratings have delivered such high powers in such narrow lines (Fig.1). This breakthrough will enable new and improved performance in high-power materials processing applications.

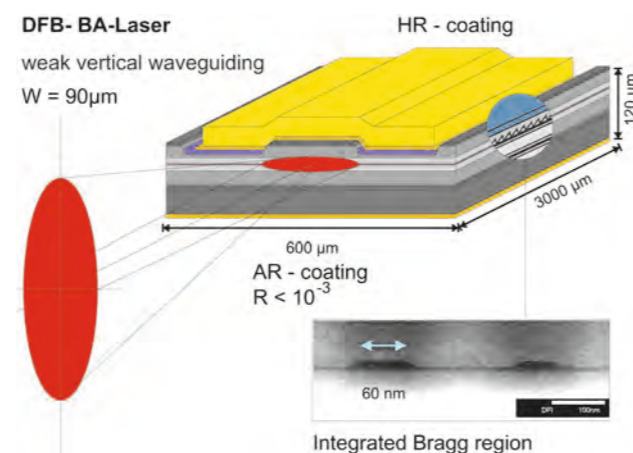


Abb. 2: Durch die Integration eines nanostrukturierten Gitters können "Distributed Feedback" (DFB)-Breitstreifen-Diodenlaser hohe Leistungen innerhalb eines schmalen Spektralbereichs emittieren.  
Fig. 2: Narrow linewidth operation of the "distributed feedback" (DFB) broad area diode laser is enabled by building nano-structured gratings deep within the semiconductor device.

Broad area lasers with integrated gratings are a low cost method to realize such high performance narrow linewidth sources. However, the introduction of gratings into diode lasers is only helpful as long as the output power and conversion efficiency are not compromised. Fig. 2 shows a schematic diagram of such a DFB-BA diode laser that includes a nano-structured grating designed to deliver narrow line, wavelength-selective feedback. The manufacture of these lasers follows three main stages. First, the vertical layer structure is grown on a GaAs wafer in an epitaxial growth reactor (MOVPE), and the growth is halted part way through. The wafer is then removed and a grating defined using lithographic and wet etching techniques. Finally, the wafer is returned to the growth reactor and the remaining part of the vertical structure is grown over the grating. After growth, the wafer is processed as normal to form high-power diode

laser-Barren abgespalten werden können. Die Facetten werden passiviert, um hohen Leistungen standhalten zu können. Durch das Abscheiden dielektrischer Schichten an der Rückfacette werden sie auf  $> 95\%$  verspiegelt bzw. an der Frontfacette auf  $< 0,1\%$  entspiegelt, so dass die rückkoppelnde Wirkung der Frontfacette gegenüber der des Gitters unterdrückt wird.

Bislang erreichten spektral schmalbandige DFB-BA-Diodenlaser Leistungen von  $\leq 5,5$  W und Konversionswirkungsgrade von  $\leq 57\%$ . Wissenschaftlern am FBH ist es im Jahr 2009 gelungen, das Design und die Herstellungsmethoden für DFB-BA-Diodenlaser so zu optimieren, dass die optische Leistung mit 11 W (siehe Kennlinien Abb. 3) verdoppelt wurde. Vorausgehende Messungen hatten gezeigt, dass der Konversionswirkungsgrad durch erhöhte optische Verluste und Betriebsspannungen begrenzt wird. Durch vergleichende Analysen von Lasern mit und ohne integriertem Gitter war es möglich, die zusätzlichen Verluste den Halbleitermaterialien im Gitterbereich zuzuordnen. Dabei konnten die Verluste im Gitterbereich durch eine optimierte Herstellungsmethode des Gitters, eine strukturelle Vereinfachung und geringere Schichtdicken minimiert werden.

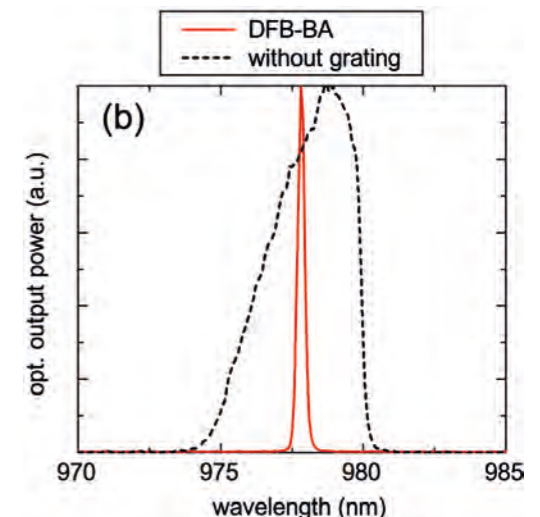
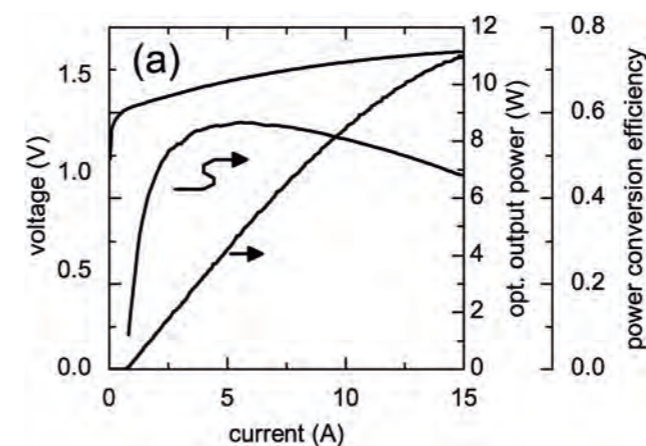


Abb. 3: Eigenschaften eines optimierten DFB-BA-Diodenlasers; (a) die Kennlinien eines Einzelemitters mit 90  $\mu$ m Streifenbreite und 3 mm Resonatorlänge zeigen eine maximale Leistung von 11 W und einen Konversionswirkungsgrad von bis zu 58%, (b) das Spektrum eines DFB-BA-Diodenlasers ist mit  $< 1$  nm (95% Leistungsein-schluss) um ein Vielfaches schmalere als das Spektrum eines Diodenlasers ohne integriertem Gitter.  
Fig. 3: Performance of an optimized DFB-BA diode laser in single emitter format, with 90  $\mu$ m stripe width and 3 mm cavity length, (a) the light-current curve demonstrates a maximum output power of 11 W and a peak power conversion efficiency of 58%, (b) the spectrum of a DFB-BA diode laser is  $< 1$  nm wide (95% power content) and thus significantly smaller than a reference device that does not contain a grating.

## Veröffentlichungen // Publications

P. Crump, C.M. Schultz, A. Pietrzak, S. Knigge, O. Brox, A. Maaßdorf, F. Bugge, H. Wenzel, and G. Erbert, „975 nm High Power Broad Area Diode Lasers Optimised for Narrow Spectral Linewidth Applications“, Proc. SPIE, vol. 7583, no. 75830N (2010).

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, A. Maaßdorf, G. Erbert and G. Tränkle, „11W Broad Area 976nm DFB Lasers with 58% Power Conversion Efficiency“, Electron. Lett., vol. 46, no. 8, accepted for publication (2010).

C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, A. Maaßdorf, G. Erbert and G. Tränkle, „11W Broad Area 976nm DFB Lasers with 58% Efficiency“, CWE1, CLEO/QELS (2010).

## EFFEKTE UND PHYSIKALISCHE GRENZEN IM HOCHLEISTUNGSBEREICH: SIMULATION UND PULSMESSUNGEN VON BREITSTREIFENLASERN

Breitstreifen-Diodenlaser werden sowohl als Pumpquellen in Laser-Systemen als auch zur direkten Materialbearbeitung eingesetzt. Für diese Anwendungen sollte die Ausgangsleistung so hoch wie möglich sein. Die maximal erreichbare Leistung ist dabei prinzipiell durch die Zerstörschwelle des Halbleiterkristalls entweder im Inneren des Laser-Resonators oder an der Facette begrenzt. Mit Maßnahmen, etwa der Verbreiterung des optischen Wellenleiters um die Leistungsdichte zu verringern, der Verbesserung der Kristallqualität und speziellen Techniken zur Facetten-Behandlung ist es gelungen, die Zerstörschwelle zu immer größeren Werten zu verschieben. Deshalb begrenzen in zunehmendem Maße intrinsische physikalische Prozesse die erreichbare Ausgangsleistung.

Im Dauerstrichbetrieb erwärmt sich der Laser, weil ein Teil der zugeführten Energie nicht in Lichtenergie umgewandelt wird. Dies führt zu einem charakteristischen Überrollen der Leistungs-Strom-Kennlinie. Die Selbsterwärmung lässt sich nahezu verhindern, wenn der Laser mit Stromimpulsen im Nanosekundenbereich betrieben wird. Obwohl unter diesen Bedingungen deutlich höhere Leistungen erreicht werden, zeigt die Leistungs-Strom-Kennlinie ein deutliches Abknicken. Um die Ursachen für dieses Phänomen herauszufinden, wurden numerische Simulationen durchgeführt und deren Ergebnisse mit Messergebnissen verglichen. Als Beispiel wurde eine Laserstruktur ausgewählt, welche im Wellenlängenbereich um 1070 nm emittiert.

Abb. 1 zeigt eine gemessene Leistungs-Strom-Kennlinie (schwarze Punkte) und zum Vergleich simulierte Kennlinien. Die Messung erfolgte mit Stromimpulsen mit einer Pulsbreite von 300 ns und einer Wiederholfrequenz von 1 kHz. Es konnte eine sehr hohe Ausgangsleistung von 90 W erreicht werden. Allerdings war dazu auch ein sehr hoher Strom von 240 A notwendig. Die Buchstaben A, B und C in der Legende von Abb. 1 bezeichnen Modelle unterschiedlicher Komplexität, die den simulierten Kennlinien zugrunde liegen.

Die Simulationen wurden in zwei Schritten durchgeführt. Zuerst wurden die transversale Ladungsträgertransportgleichung und die Wellenleitungsgleichung mit dem finite-elemente-basierten Programm WIAS-TeSCA gelöst. Mit den Resultaten wurden anschließend die longitudinalen Profile der optischen Leistung und die Leistungs-Strom-Kennlinien berechnet. Bei letzteren wurde so genanntes "longitudinales räumliches Lochbrennen" (LSH) und "spektrales Lochbrennen" (SHB) berücksichtigt.

## PHYSICAL EFFECTS LIMITING THE OPTICAL POWER: SIMULATION AND MEASUREMENT OF BA LASERS UNDER PULSED OPERATION

Broad-area (BA) diode lasers are widely used as pump sources in laser systems as well as for direct material processing. For such applications the optical output power should be as high as possible. In principle, the maximum achievable power is limited by the damage threshold of the semiconductor crystal (catastrophic optical damage, COD), either within the laser cavity or at the facets. However, different measures like reducing the power density by broadening the optical waveguide, improving the crystal quality and special facet treatments significantly increased the COD power. Thus, intrinsic physical effects typically limit the achievable power rather than material failure.

Under continuous-wave operation the laser heats up as a part of the electrical energy supplied is not converted into photons leaving the laser. This leads to a characteristic rollover of the power-current characteristics. Under operation with nanosecond pulses, self-heating can be excluded and much higher output can be reached. However, even under these operating conditions the output power saturates. To address this issue, measurements combined with simulations have been used to diagnose the effects that limit peak optical output power in semiconductor diode lasers. A laser emitting around 1070 nm was chosen to illustrate these limiting effects.

Fig. 1 shows the measured (dots) and simulated (lines) pulsed power-current characteristics. During the experiment, the laser was driven with short current pulses with a pulse width of 300 ns and a repetition rate of 1 kHz. Thus, a very high maximum output power of 90 W was obtained at a current of 240 A, with peak power limited by strong saturation effects. The labels A, B and C in the legend of Fig. 1 denote the simulated characteristics based on models with different complexity.

Simulations were performed in two steps. At first, the transverse carrier transport and waveguide equations were solved self-consistently by the finite-element tool WIAS-TeSCA. The results were then used to compute the longitudinal profiles of optical power and power-current characteristics, taking into account longitudinal spatial hole burning (LSH) and spectral hole burning (SHB).

Power saturation is predicted even in the simplest case (model A), where LSH and SHB are neglected. The reason can be inferred from Fig. 2, which shows the transverse profiles of band-edge energies, quasi-Fermi energies and carrier densities at an output power of approximately 100 W. The voltage drop in both, the n- and p-doped layers at high current, manifests in a bending of the quasi-Fermi energies of electrons and holes,

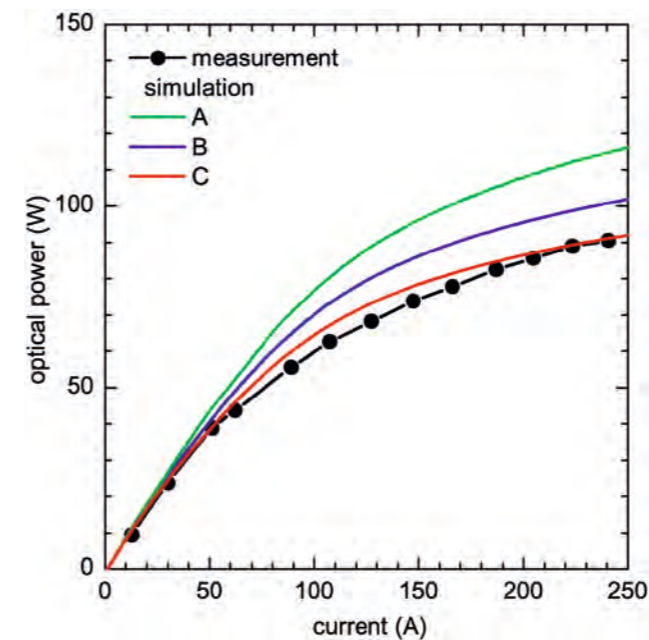


Abb. 1: Leistungs-Strom-Kennlinien eines Lasers mit 4 mm Resonatorlänge und 100  $\mu\text{m}$  Streifenbreite. Die roten Punkte zeigen experimentelle Ergebnisse, erzielt mit 300 ns langen Stromimpulsen. Die grünen, blauen und roten Linien sind Simulationsergebnisse basierend auf Modellen unterschiedlicher Komplexität.

Fig. 1: Power-current characteristics for a laser with 4 mm cavity length and 100  $\mu\text{m}$  stripe width. Red dots represent experimental results obtained with 300 ns long current pulses. The green, blue and red lines are results of simulations using models with different complexity.

Eine Sättigung der Ausgangsleistung erhält man bereits mit dem einfachsten Modell A, welches LSH und SHB vernachlässigt. Den Grund dafür kann man Abb. 2 entnehmen, die die transversalen Profile der Bandkanten, Quasi-Fermi-Energien und Ladungsträger bei einer Ausgangsleistung von ungefähr 100 W zeigt. Der bei großen Strömen auftretende Spannungsabfall in den n- und p-dotierten Bahngebieten äußert sich in einer entsprechenden Verbiegung der Quasi-Fermi-Energien und als Konsequenz auch in einer Verbiegung der Bandkanten. Dies führt zu einem linearen Anstieg der Elektrodendichte in der p-dotierten Wellenleitungsschicht und einem ähnlichen, wenn auch geringerem Anstieg der Löcherdichte in der n-dotierten Wellenleitungsschicht mit zunehmendem Abstand von der aktiven Schicht. Da in diesen Schichten sowohl Elektronen als auch Löcher vorhanden sind, können diese rekombinieren und somit verloren gehen oder zu zusätzlicher Absorption führen. Das Vorhandensein einer großen Zahl von Ladungsträgern im Wellenleiter wurde experimentell durch eine Messung der spontanen Emission unter einem großen Winkel an der Frontfacette nachgewiesen. Das starke Abknicken der Kennlinie kann jedoch nur reproduziert werden, wenn zusätzlich LSH berücksichtigt wird (Modell B). Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation wird mit Modell C erreicht, bei dem zusätzlich SHB mit einer Sättigungsleistung von 300 W, entsprechend einem nichtlinearen Gewinnsättigungsfaktor von ungefähr  $10^{-17} \text{ cm}^3$  einbezogen wurde.

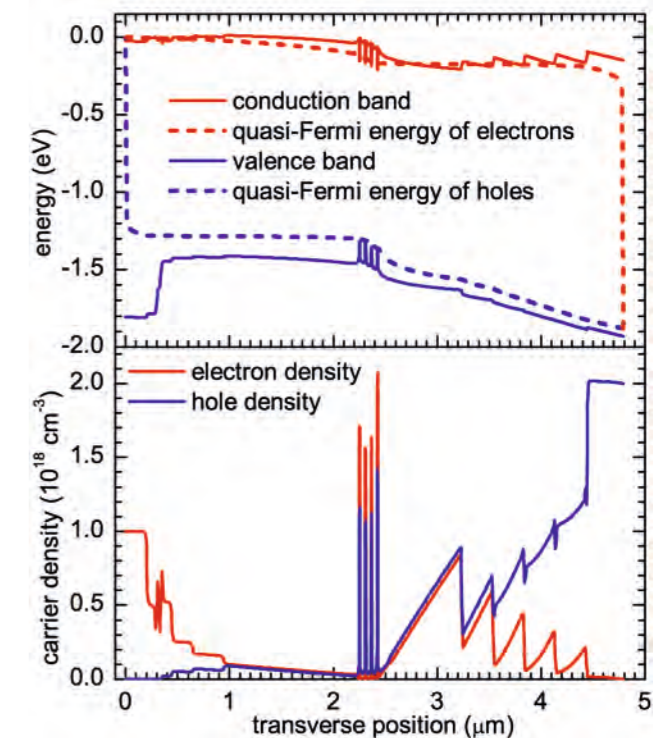


Abb. 2: Simulierte transversale Profile der Leitungs- und Valenzbandkanten sowie der Quasi-Fermi-Energien (oben) und der Elektronen- und Löcherdichten (unten) bei einer Ausgangsleistung von 100 W (Modell A).

Fig. 2: Simulated transverse profiles of conduction and valence band-edge energies as well as quasi-Fermi energies (top) and electron and hole densities (bottom) at a power of  $P = 100 \text{ W}$  (model A).

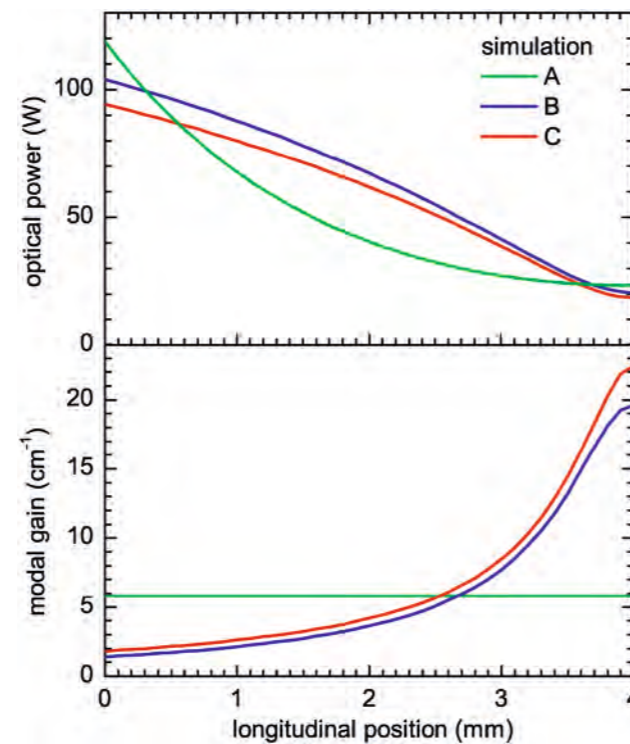
respectively. Consequently, this leads to a bending of the corresponding band-edge energies, causing a linear rise of the electron density in the p-confinement layer and even in the GRIN. A weaker rise of the hole density in the n-confinement layer with increasing distance from the QWs can be observed. As both electrons and holes are present in high density outside the active region, they can recombine and be lost or generate additional optical absorption. Both effects lead to power saturation. The presence of large numbers of carriers in the waveguide was confirmed experimentally by studying the spontaneous emission spectrum from the facet. In model B, LSH is also taken into account, leading to stronger power saturation. The best agreement between measurement and simulation is obtained with model C, where SHB is additionally considered to LSH. Here, SHB with a saturation power of 300 W was used, corresponding to a gain compression factor of about  $10^{-17} \text{ cm}^3$ .

To illustrate the importance of LSH, Fig. 3 shows the longitudinal profiles of the optical power and the modal gain for the different models. Model A assumes a constant gain along the cavity, which leads to an almost exponential growth of power towards the front facet at position 0 (green curves). LSH (as accounted for in model B) leads to a strong gain reduction in the vicinity of the front facet, which is compensated by a corresponding rise of the gain at the rear facet at position 4 mm. This results in a flatter power profile (blue curves)

Abb. 3 zeigt die longitudinalen Profile der optischen Leistung und der modalen Verstärkung, welche mit den verschiedenen Modellen berechnet wurden. Beim Modell A wird eine konstante Verstärkung längs des Resonators angenommen, was zu einer nahezu exponentiellen Zunahme der Leistung in Richtung der Frontfacette bei Position 0 führt (grüne Kurven). LSH, wie in Modell B berücksichtigt, führt zu einer starken Reduktion der Verstärkung in der Umgebung der Frontfacette. Dies wird durch eine entsprechend größere Verstärkung im Bereich der Rückfacette bei der Position 4 mm kompensiert. Das Resultat ist ein deutlich flacheres Leistungsprofil und folglich eine geringere Ausgangsleistung an der Frontfacette (blaue Kurven). SHB (Modell C, rote Kurven) verstärkt diesen Effekt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Breitstreifen-Diodenlaser, die mit kurzen Stromimpulsen betrieben werden, eine Sättigung der Ausgangsleistung bei hohen Strömen zeigen. Theoretische Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Ursachen eine Ladungsträgeranreicherung im Wellenleiter aufgrund einer Bandverbiegung, longitudinales räumliches Lochbrennen und spektrales Lochbrennen sind. Die Kenntnis über diese begrenzenden Effekte ermöglicht in Zukunft ein verbessertes Design von Diodenlasern mit signifikant höheren Ausgangsleistungen.

Abb. 3: Simulierte longitudinale Profile der optischen Leistungs- (oben) und Moden-Verstärkung (unten) für verschiedene Modelle.  
Fig. 3: Simulated longitudinal profiles of optical power (top) and modal gain (bottom) for the different models.



and hence in lower output power from the front facet. SHB (model C, red curves) enhances this effect.

In conclusion, strong power saturation has been observed which limits the output of broad-area diode lasers under short-pulse conditions. Theoretical studies indicate that the saturation arises from carriers accumulating in the waveguide due to band-bending at high bias, longitudinal spatial hole burning and spectral hole burning. Identifying such limiting effects will enable targeted design improvements to produce next generation diode lasers with significantly higher peak output powers.

## KOMPAKTE MODULE FÜR LASERSTRAHLUNG HOHER LEISTUNG IM SICHTBAREN SPEKTRALBEREICH

Um Laserstrahlung mit hoher Leistung im blauen und grünen Spektralbereich von 450 nm bis 560 nm zu erzeugen, nutzt man entweder Gaslaser oder bedient sich der Frequenzverdopplung infraroter, brillanter Festkörper- oder Halbleiterlaser. Letztere sind aufgrund ihrer kleinen Abmaße, hohen Effizienz, einstellbaren Emissionswellenlänge und langen Lebensdauer besonders geeignet. Dem FBH ist es gelungen, erstmalig hochbrillante Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich mit hohen Ausgangsleistungen aus einem Modul von der Größe einer Streichholzschachtel zu erzeugen (siehe Abb.1). Dieses kompakte Modul emittiert 1 W bei 490 nm mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlung. Laser mit diesen Leistungs- und Strahlparametern im sichtbaren Wellenlängenbereich werden als Lichtquellen für die Display-technologie, Medizin- und Messtechnik benötigt.

## COMPACT HIGH-POWER LASER MODULES FOR THE VISIBLE SPECTRAL RANGE

High-power laser radiation in the blue and green spectral range between 450 nm and 560 nm can be either generated with gas lasers or by frequency conversion of brilliant infrared solid-state or semiconductor lasers, respectively. The latter are particularly suitable due to their small size, high efficiency, long lifetime and tuneability of the emission wavelength. FBH successfully demonstrated high-power and high-brilliance laser radiation in the visible spectral range for the first time from a module sized as small as a matchbox (see Fig.1). The compact module emits 1 W at 490 nm in a nearly diffraction limited beam. Lasers providing such output powers and beam properties in the visible spectral range are required as light sources for applications such as display technology, medical engineering, or for non-contact measurements.

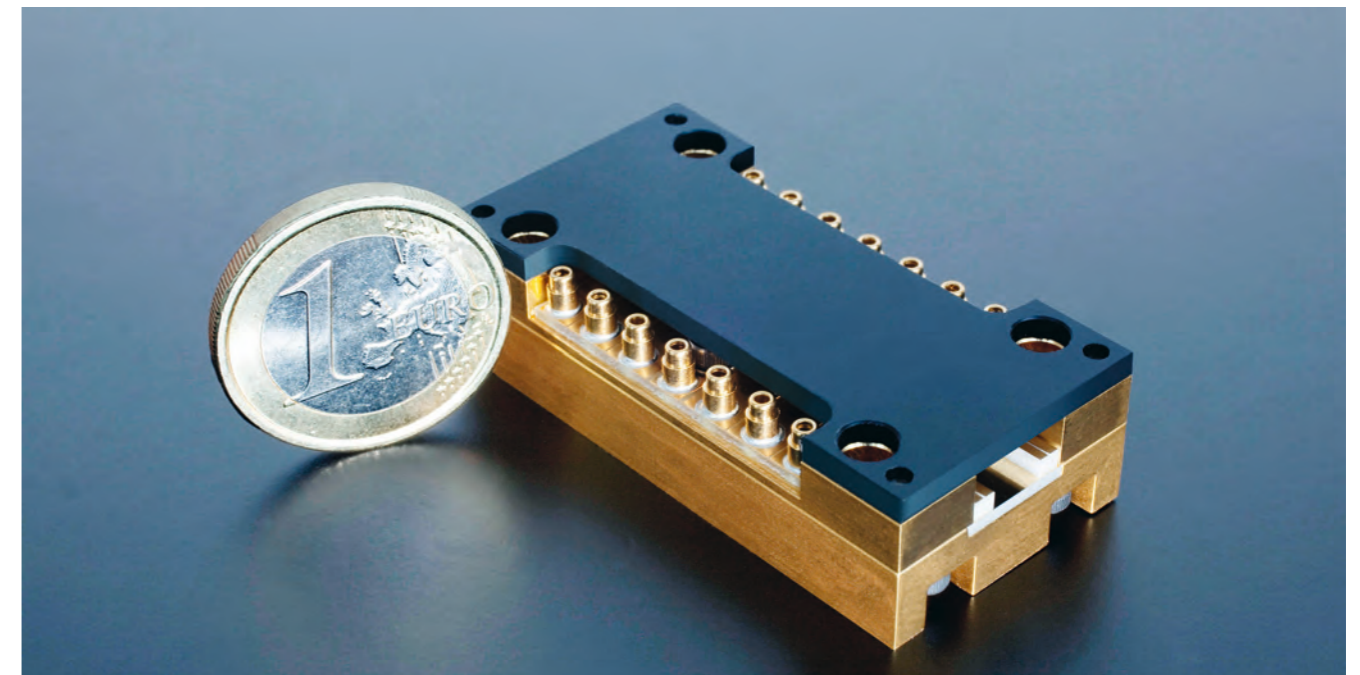


Abb. 1: Miniaturisiertes Lasermodul mit einer Ausgangswellenlänge von 490 nm.  
Fig. 1: Miniaturized laser module with a wavelength of 490 nm.

## Veröffentlichungen // Publications

A. Pietrzak, P. Crump, H. Wenzel, R. Staske, G. Erbert, and G. Tränkle, „55 W peak power from 1100 nm wavelength 60  $\mu\text{m}$  broad-area laser diodes enabled by reduced carrier accumulation in the waveguide“, *Semicond. Sci. Technol.* 24, 035020 (2009).

X. Wang, P. Crump, A. Pietrzak, C. Schultz, A. Klehr, T. Hoffmann, A. Liero, A. Ginolas, S. Einfeldt, F. Bugge, G. Erbert, and G. Tränkle, „Assessment of the limits to peak power of 1100 nm broad area single emitter diode lasers under short pulse conditions“, *Proc. SPIE* 7198, 71981G (2009).

H. Wenzel, P. Crump, A. Pietrzak, C. Roder, R. Staske, X. Wang and G. Erbert, „Maximum output power of broad-area laser diodes“, *Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Conf. Numerical Simulation of Optoelectronic Devices NUSOD* (2009).

H. Wenzel, P. Crump, A. Pietrzak, C. Roder, X. Wang, and G. Erbert, „The analysis of factors limiting the maximum output power of broad-area laser diodes“, accepted by *Opt. Quant. Electron.* (2010).

H. Wenzel, P. Crump, A. Pietrzak, X. Wang, G. Erbert, and G. Tränkle, „Theoretical and experimental investigations of the limits to the maximum output power of laser diodes“, accepted by *New J. Phys.* (2010).

Das Modul enthält einen leistungsstarken hochbrillanten Pumplaser, der im nahen Infrarot emittiert, und einen optisch nichtlinearen Kristall zur Wellenlängentransformation in den sichtbaren Spektralbereich. Als Pumplaser wurde ein am FBH entwickelter Distributed-Bragg-Reflector-Trapez Laser verwendet. Dieser Diodenlaser emittiert eine Leistung von 10 W bei 980 nm mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlung in einem extrem schmalen Spektralbereich. Alle drei Faktoren Leistung, Strahlqualität und spektrale Charakteristik sind entscheidend für die effiziente Umwandlung in sichtbares Licht. Diese Umwandlung wird mittels einem einfachen Durchgang

The module contains a powerful high-brilliance pump laser emitting in the near infrared and a nonlinear crystal for wavelength conversion into the visible range. A distributed-Bragg-reflector tapered laser developed by the FBH is used as pump laser. These diode lasers are capable of emitting an output power of about 10 W in a small spectral range and a nearly diffraction limited beam. All three properties output power, beam quality and spectral characteristic are decisive for efficient conversion into visible light. Such conversion has been realized by a single-pass through a periodically poled lithium-niobate crystal ( $\text{LiNbO}_3$ ). Fig. 2 shows the optical output power

(single-pass) durch einen periodisch gepolten Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ )-Kristall realisiert. Abb. 2 zeigt die Ausgangsleistung der erzeugten sichtbaren Laserstrahlung als Funktion des injizierten Pumpstromes in den Diodenlaser. Bei einem Pumpstrom von 14 A wird eine Ausgangsleistung von 1 W bei 490 nm erreicht. Messungen über typische Einsatzzeiten (Abb. 3) von 1,5 Stunden zeigen eine hohe Leistungsstabilität mit Schwankungen  $< 2\%$ . Die Änderung der emittierten Wellenlänge ist in dieser Zeit  $< 10$  pm.

Diese Ergebnisse entstanden im Rahmen der vom BMBF geförderten InnoProfile-Initiative "Hybride Diodenlaser-Systeme".

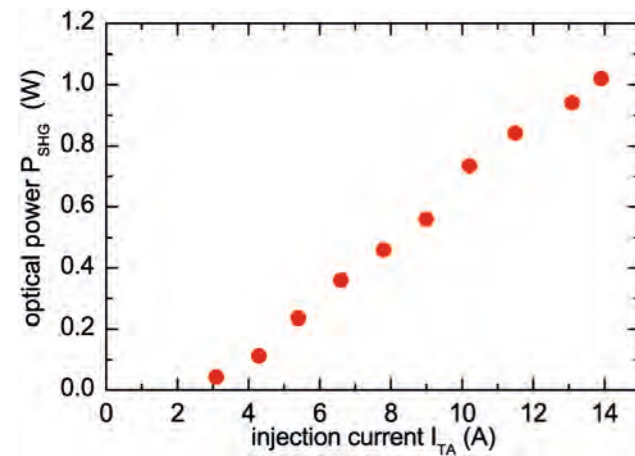


Abb. 2: Leistungskennlinie als Funktion des Stromes.  
Fig. 2: Optical output power as function of the current.

of the visible light as function of the injection current from the diode laser. At an operating current of 14 A, the module emits 1 W at 490 nm. Measurements over typical operating times of 1.5 h (Fig. 3) show an output power stability better than 2%. During the measurement time the wavelength shift is below 10 pm.

These results have been achieved within the InnoProfile-Initiative "Hybride Diodenlaser-Systeme" funded by the BMBF.

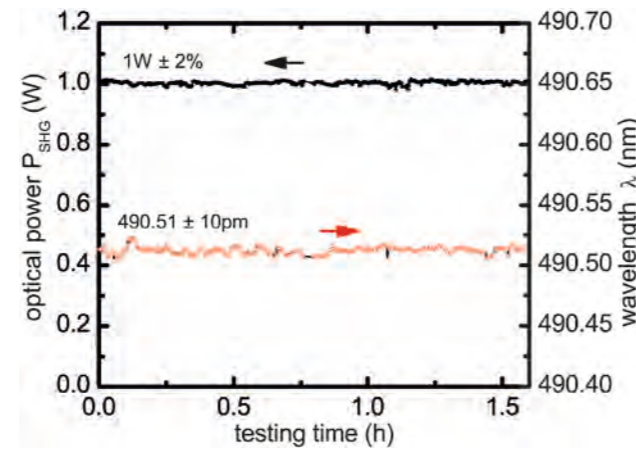


Abb. 3: Stabilitätsmessung bei 1 W Laserleistung.  
Fig. 3: Stability measurements at an output power of 1 W.

## Veröffentlichungen // Publications

K. Paschke, G. Blume, C. Fiebig, A. Sahn, D. Feise, M. Uebernickel, G. Erbert, and G. Tränkle, „Compact Watt-class visible light sources using direct frequency-doubled edge-emitting diode lasers”, Proceedings of SPIE, Vol. 7193, 52 (2009).

C. Fiebig, A. Sahn, M. Uebernickel, G. Blume, B. Eppich, K. Paschke, and G. Erbert, „Compact second-harmonic generation laser module with 1 W optical output power at 490 nm”, Optics Express, Vol. 17, No. 25, pp. 22785-22790 (2009).

A. Jechow, R. Menzel, K. Paschke, G. Erbert, „Blue-green light generation using high brilliance edge emitting diode lasers”, Laser & Photonics Review, published online Dec. (2009).

O. Jensen, P. Andersen, B. Sumpf, K.-H. Hasler, G. Erbert, and P. Petersen, „1.5 W green light generation by single-pass second harmonic generation of a single-frequency tapered diode laser”, Optics Express, Vol. 17, No. 8, pp. 6532-6539 (2009).

## ROT EMITTIERENDE LASERSTRAHL-QUELLEN MIT HOHER LEUCHTDICHTE

Lasershow, Laser-TV und medizinische Applikationen benötigen kompakte Lasermodule im roten Spektralbereich zwischen 635 nm und 640 nm mit hohen Leuchtdichten. Der Begriff Leuchtdichte (in Candela/m<sup>2</sup>) verbindet die Leistung und Strahlqualität des Lasers mit der Sichtbarkeit der verwendeten Wellenlänge. Über die Leuchtdichte und die Leistung können verschiedene im sichtbaren Spektralbereich emittierende Laserstrahlquellen miteinander verglichen werden. Für die genannten Anwendungen werden Leuchtdichten im Bereich von 150 Tcd/m<sup>2</sup> und Leistungen um 5 W benötigt – Werte, die mit direkt emittierenden und kompakten Laserlichtquellen bislang nicht verfügbar sind.

Mit den am Ferdinand-Braun-Institut entwickelten Trapezlasern ist es gelungen, hohe Leuchtdichten bei kompakten Modulabmessungen in der Größe einer Streichholzschachtel zu erreichen (Abb. 1). Dazu wird der Trapezlaserchip mit einer Kollimationsoptik auf einer mikrooptischen Bank integriert. Die Kollimationsoptik erlaubt eine Anpassung der Strahlparameter an die jeweilige Anwendung. Der Astigmatismus der verwendeten Trapezlaser erfordert eine getrennte Kollimation in vertikaler und horizontaler Richtung.

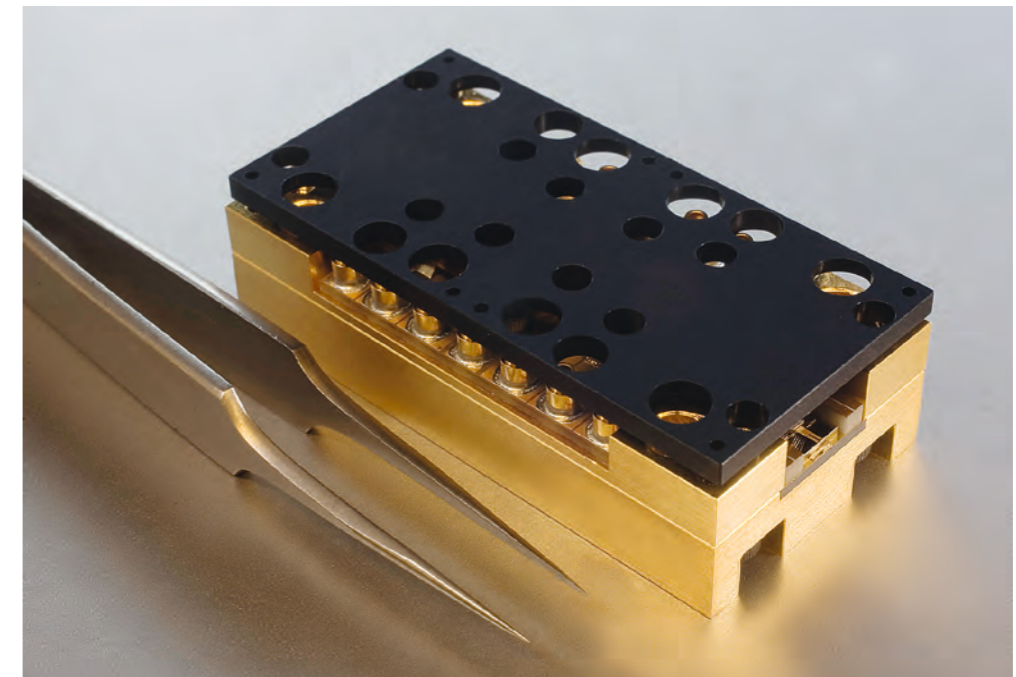


Abb. 1: Kompaktes Lasermodul mit hoher Leuchtdichte im roten Spektralbereich.  
Fig. 1: Compact laser module with high luminance in the red spectral region.

Das bedingt eine unabhängige Strahlformung in beiden Richtungen. Eine direkte elektrische Modulation ist bis 40 MHz möglich. Bei den Trapezlasermodulen mit Kollimationsoptik aus dem FBH ist es bereits gelungen, eine optische Ausgangsleistung von 0,44 W bei einem Strom von 1,1 A und einer Temperatur von 15°C zu erzeugen

## RED EMITTING LASER LIGHT SOURCES WITH HIGH LUMINANCE

Laser shows, Laser TV and medical applications require compact laser modules with high luminance in the red spectral region between 635 nm and 640 nm. The term luminance (in Candela/m<sup>2</sup>) combines power and beam quality of the laser with the visibility of the used wavelength. Luminance and power allow comparisons of lasers emitting at different wavelengths in the visible spectral region. For the applications mentioned above, a luminance in the range of 150 Tcd/m<sup>2</sup> and a power of about 5 Watts are required – values that are not yet available from direct emitting and compact laser light sources.

By using tapered laser diodes developed at the Ferdinand-Braun-Institut, a high luminance combined with small module dimensions (match-box size) has been achieved (see Fig. 1). In such modules, a tapered laser chip is integrated with collimating optics on a micro-optical bench. Using collimating optics allows the beam parameters to be adapted to the actual application. The astigmatism of the used tapered laser diodes demands a separate collimation in vertical and horizontal direction, which allows independent beam shaping in both directions.

By using these tapered laser modules with collimating optics, an optical output power of 0.44 W at an electrical current of 1.1 A and a temperature of 15°C could be achieved (see Fig. 2). A direct electrical modulation up to 40 MHz is possible. The beam diameter is about 1.49 mm in the horizontal and about 1.16 mm in the

(Abb. 2). Der Strahldurchmesser liegt in der Horizontalen bei 1,49 mm und in der Vertikalen bei 1,16 mm. Die dazugehörigen Divergenzen betragen horizontal 0,53 mrad und vertikal 1,06 mrad (Abb. 3). Damit ergibt sich bei einer Wellenlänge von rund 639 nm eine horizontale Beugungsmaßzahl  $M^2$  von 1,1 und eine vertikale Beugungsmaßzahl  $M^2$  von 1,3. Das entspricht einer Leuchtdichte von 9,5 Tcd/m<sup>2</sup>.

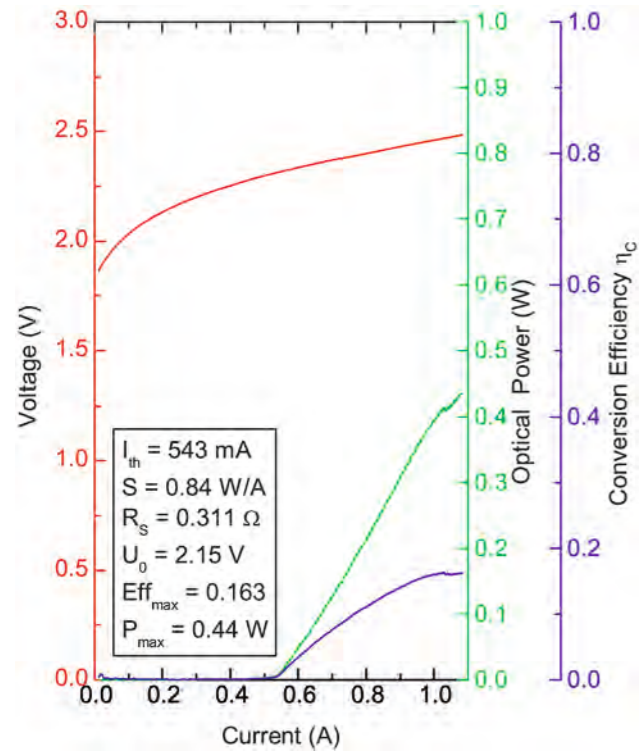


Abb. 2: Kennlinie eines 639 nm-Lasermoduls bei 15°C.  
Fig. 2: Characteristic curve of a 639 nm laser module at 15°C.

Je kleiner die Beugungsmaßzahl desto höher die Strahlqualität und damit, bei feststehender Wellenlänge und Leistung, auch die Leuchtdichte. Damit beträgt die erreichte Leuchtdichte der am FBH entwickelten miniaturisierten Module ein Vielfaches der Leuchtdichte der Sonne (1,6 Gcd/m<sup>2</sup>).

Für das kommende Jahr sind optische Leistungen über 1 W mit guter Strahlqualität angestrebt, d.h. mit einem  $M^2$  unter 3 und einer Leuchtdichte im Bereich von 25 Tcd/m<sup>2</sup>. Ein Weg dieses Ziel zu erreichen liegt in der Kombination mehrerer Emittier.

vertical direction. The vertical divergence is about 0.53 mrad and the horizontal about 1.06 mrad (see Fig. 3). With a wavelength of 639 nm this results in beam propagation factors  $M^2$  of 1.1 (horizontal) and 1.3 (vertical). The corresponding luminance is 9.5 Tcd/m<sup>2</sup>.

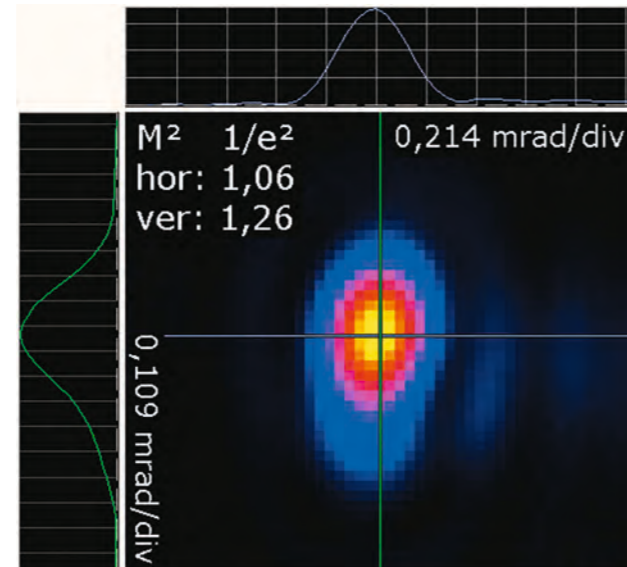


Abb. 3: Fernfeld-Strahlprofil des kollimierten 639 nm-Lasermoduls bei 440 mW.  
Fig. 3: Far field beam profile of the collimated 639 nm laser module at 440 mW.

Reducing the beam propagation factor improves the beam quality and thus increases the luminance to a fixed wavelength and power. The luminance of the final module is greater than that of sunlight as required for many outdoor display applications.

Within the next year, the FBH is aiming for an optical power of above 1 W with good beam quality ( $M^2 < 3$ ) and a luminance of up to 25 Tcd/m<sup>2</sup>. The combination of multiple emitters may be needed to achieve this goal.

## MIKROSYSTEM-LASERSTRAHLQUELLEN FÜR DIE MATERIALANALYTIK

In der Materialanalytik müssen unterschiedliche Stoffe und Stoffgemische zuverlässig identifiziert werden. Speziell die Raman-Spektroskopie, bei der charakteristische Schwingungen von Molekülen ausgewertet werden, bietet mit ihren "Fingerprint-Spektren" eine zuverlässige Methode. Als Anregungsquellen für den Raman-Effekt werden spektral schmalbandige Diodenlaser im roten und grün-blauen Spektralbereich benötigt. Da Laserdioden für diesen Wellenlängenbereich mit einer geringen Linienbreite nicht verfügbar sind, eröffnet erst die Nutzung der Mikrosystemtechnik neue Möglichkeiten. Am FBH ist es gelungen, speziell für die Raman-Spektroskopie zugeschnittene Mikrosystem-Anregungslichtquellen bei 671 nm und 488 nm zu demonstrieren. Damit liegen Konzepte für Halbleiterlaser basierte Mikrosystemlichtquellen vor, die Möglichkeiten zur Realisierung individuell angepasster Lichtquellen für eine Vielzahl sensorischer und spektroskopischer Anwendungen eröffnen. Diese liegen etwa in der in-situ Überwachung von Lebensmitteln und ihren Zusatzstoffen, bei der Laborproben nicht mehr eingeschickt werden müssen, sondern gleich vor Ort untersucht werden können. Weitere Einsatzgebiete finden sich in der kontaktfreien Spurenanalytik und nicht-invasiven, klinischen Diagnostik.

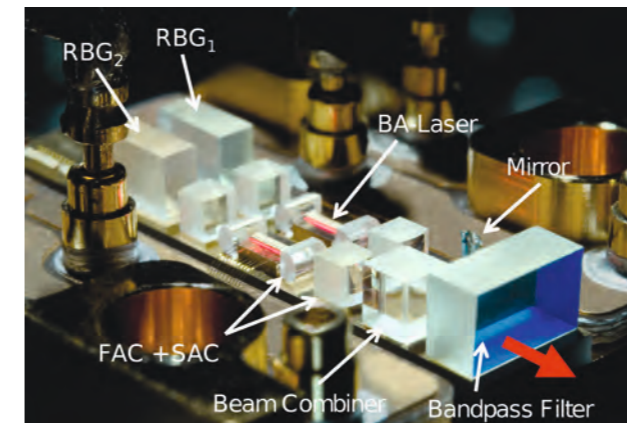


Abb. 1: SERDS-Lichtquelle bei 671 nm.  
Fig. 1: SERDS light source for 671 nm.

Die Anregung des Raman-Effektes mit sichtbarem Laserlicht bietet auf Grund seiner Abhängigkeit von der Anregungswellenlänge ( $\lambda^{-4}$ ) den Vorteil einer höheren Signalintensität. Nachteil dieser Anregungswellenlängen ist, dass es zur Generierung von Störlicht, etwa durch Fluoreszenz, kommen kann, das die ohnehin schwachen Raman-Signale überdeckt. Mit der Methode der "Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy" (SERDS) lassen sich die Raman-Signale vom Störunter-

## MICRO-SYSTEM LIGHT SOURCES FOR CHEMICAL ANALYSIS OF MATERIALS

Chemical analysis of materials identifies different substances and their composites. Specifically, Raman spectroscopy, which uses characteristic vibrational spectra of molecules, is a very reliable technique providing so-called "fingerprint" spectra. To excite the Raman effect, narrow linewidth diode lasers in the red and green-blue spectral range are required. Laser diodes for these wavelength ranges with a narrow spectral linewidth are not available. However, microsystems technology offers new solutions. Recently, light sources specifically designed for Raman spectroscopy have been successfully demonstrated at the FBH at wavelengths of 671 nm and 488 nm. These novel concepts open up new opportunities for customized semiconductor-based micro-system light sources in a variety of sensing and spectroscopic applications, including in-situ monitoring of food and their additives. On-site measurements could be conducted eliminating the need for time consuming laboratory testing. Further applications are contact-free trace analysis and non-invasive clinical diagnostics.

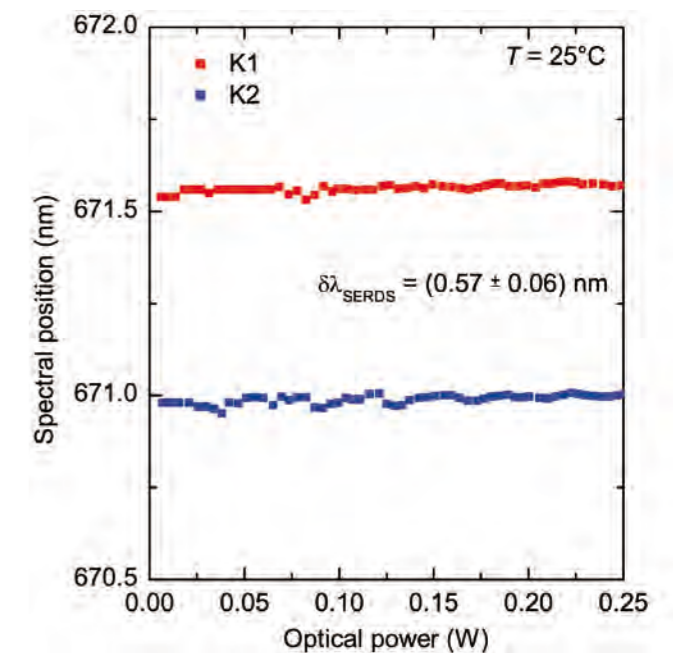


Abb. 2: Spektrale Lage der Emission der 671 nm Mikrosystemlichtquelle für SERDS bei T = 25°C.  
Fig. 2: Spectral position of the emission for the 671 nm micro-system SERDS light source at T = 25°C.

Due to its dependence on the wavelength ( $\lambda^{-4}$ ), the excitation of the Raman effect in the visible spectral range offers the advantage of higher signal intensity compared to wavelengths in the near infrared. The unwanted side effect is that interfering light may be generated by fluorescence effects, which is superimposed on the already weak Raman signal. However, the "shifted excitation Raman difference spectroscopy" (SERDS) allows the Raman lines to be reconstructed from the



grund separieren. Das Prinzip von SERDS basiert dabei auf der Anregung des Raman-Effektes mit zwei spektral dicht beieinander liegenden Wellenlängen im Abstand der Halbwertsbreite typischer Raman-Linien von Flüssigkeiten und Festkörpern ( $10 \text{ cm}^{-1}$  bzw.  $0,5 \text{ nm}$ ). Da sich bei dieser unterschiedlichen Anregung die gemessenen Untergrundspektren nur gering verschieben, kann über eine Differenzbildung und eine entsprechende Rekonstruktion der Spektren ein untergrundbereinigtes Ramanspektrum erhalten werden.

Bei einer Wellenlänge von  $671 \text{ nm}$  wurde eine derartige Anregungsquelle bestehend aus zwei External-Cavity-Lasern auf einer Mikrobank von nur  $5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  untergebracht, wie in Abb. 1 dargestellt. Auf dieser Grundfläche wurden insgesamt 13 mikrooptische Komponenten mit einer Genauigkeit im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich justiert und fixiert. Jede der Lichtquellen erreichte bei einem Anregungsstrom von  $600 \text{ mA}$  eine für die Raman-Spektroskopie ausreichende Leistung von mehr als  $300 \text{ mW}$ . Festgelegt durch die Reflexions-Bragg-Gitter waren dabei sowohl die Zentralwellenlängen der Quellen als auch der spektrale Abstand beider über den gesamten Leistungsbereich konstant, wie in Abb. 2 gezeigt.

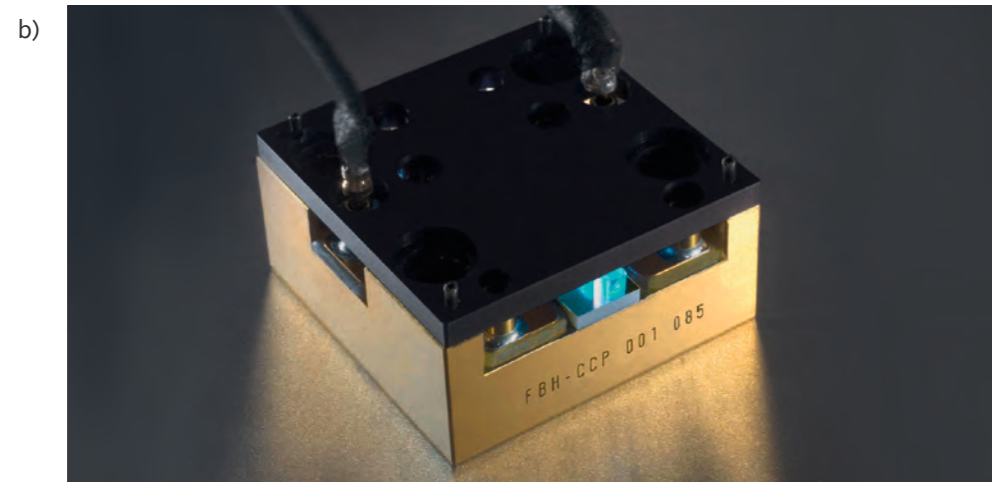
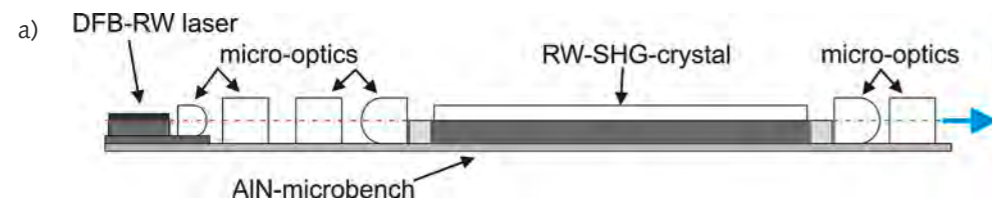


Abb. 3: a) Schema der Lichtquelle bei  $488 \text{ nm}$ ; b) realisierte Lichtquelle.  
Fig. 3: a) Scheme of the  $488 \text{ nm}$  light source; b) light source in operation.

Im Falle der SERDS-Lichtquelle bei  $488 \text{ nm}$  (Abb. 3) erfolgte die notwendige Wellenlängenverschiebung durch eine Veränderung der Temperatur der Wärmesenke. Möglich war dies durch das neuartige Konzept einer gemeinsamen Temperierung von Diodenlaser und SHG-Wellenleiterkristall auf einer Aluminiumnitrid-Mikrobank. Abb. 4 zeigt, dass bei Veränderung der Temperatur um

interfering background. SERDS is based on the excitation of the Raman effect with light at two spectrally closely spaced wavelengths. The wavelength spacing must correspond to the full-width at half-maximum of Raman lines typical for liquids and solids ( $10 \text{ cm}^{-1}$  or  $0.5 \text{ nm}$ ). Using this excitation, the background spectra remains approximately constant whereas the measured Raman lines shift. By calculating the difference of the spectra and using a mathematical reconstruction algorithm for the lines, a nearly background-free Raman spectra can be obtained.

A SERDS light source operating at  $671 \text{ nm}$  and consisting of two external cavity lasers on one micro-bench is shown in Fig. 1. The microbench has a footprint of  $5 \times 20 \text{ mm}$ . Within this footprint, a total of 13 micro-optical components were adjusted and mounted with an accuracy in the sub- $\mu\text{m}$  range. At an excitation current of  $600 \text{ mA}$ , both light sources achieved an output power up to  $300 \text{ mW}$ , which is sufficient for Raman spectroscopy. The spectral positions as well as the wavelength spacing are determined by the properties of the reflection Bragg gratings and were constant over the whole output power range as shown in Fig. 2.

A SERDS light source centered at  $488 \text{ nm}$  (Fig. 3) was developed, based on frequency conversion. This light source was spectrally tuned by changing the temperature of the heat sink. This was only possible due to a new concept for common temperature control of diode laser and SHG waveguide crystal, both mounted on the same aluminum nitride micro-bench. Fig. 4 illustrates

etwa  $8 \text{ K}$  der erforderliche Wellenlängen-Shift um  $0,3 \text{ nm}$  realisiert wird. Bei der gezeigten Durchstimmung ändert sich die Ausgangsleistung der Quelle nur um etwa  $20\%$ .

Beide Lichtquellen sind mit den demonstrierten Daten für die Raman-Spektroskopie geeignet. SERDS-Experimente an Modellsubstanzen wurden in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Laserspektroskopie des Instituts für Optik und Atomare Physik der TU Berlin durchgeführt. Bei Verwendung der  $671 \text{ nm}$ -Quelle zur Untersuchung von Alkohol, konnte eine Verbesserung des Signal-zu-Untergrund-Verhältnisses um eine Größenordnung erreicht werden. Bei Anwendung der  $488 \text{ nm}$ -Quelle konnte durch die Kombination von Resonanz-Raman-Spektroskopie und SERDS für den in der Kritik stehenden Lebensmittelfarbstoff E 102 (Tartrazin) eine Konzentration im  $\mu\text{mol/l}$ -Bereich sicher nachgewiesen werden.

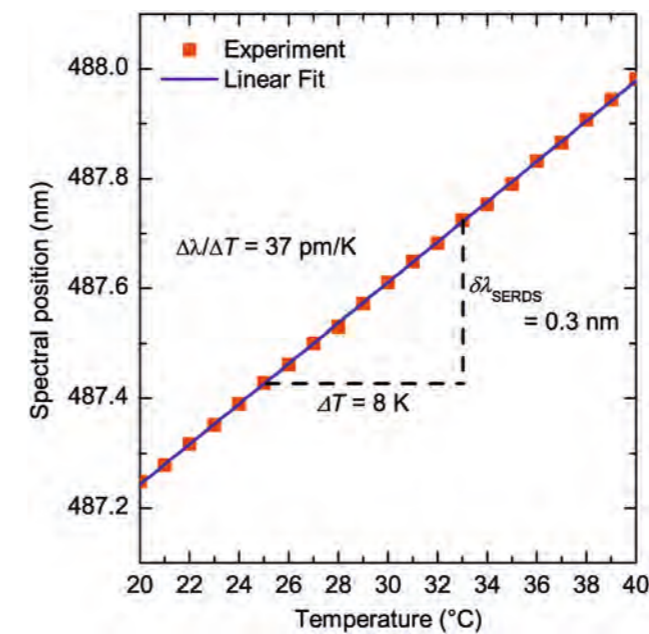


Abb. 4: Spektrale Lage der SHG-Wellenlänge des Lasermoduls in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$ .  
Fig. 4: Spectral position of the SHG wavelength of the  $488 \text{ nm}$  laser module as a function of temperature  $T$ .

that by changing the temperature by about  $8 \text{ K}$ , a wavelength shift of around  $0.3 \text{ nm}$  can be realized as required for SERDS. During this tuning, the output power of the source changes only by  $20\%$ .

Both light sources prove to be well-suited for Raman spectroscopy. In joint experiments with the Laser Spectroscopy Group at the Institute for Optics and Atomic Physics of the Technische Universität Berlin, SERDS experiments based on model substances were performed. Using the  $671 \text{ nm}$  light source to investigate ethanol, an improvement of the signal-to-background ratio of one order of magnitude was demonstrated. The application of the  $488 \text{ nm}$  source allows the combination of resonance Raman spectroscopy and SERDS to be used, and both the synthetic azo dye and food colorant tartrazine (FD&C Yellow 5, E 102) could be identified at concentration levels to the  $\mu\text{mol/l}$  range.

## Veröffentlichungen // Publications

M. Maiwald, A. Ginolas, A. Müller, A. Sahm, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, „Wavelength Stabilized Compact Diode Laser System on a Micro-Optical Bench with  $1.5 \text{ W}$  Optical Output Power at  $671 \text{ nm}$ “, IEEE Photonics Technology Letters 20, 1627-1629 (2008).

M. Maiwald, D. Jedrejczyk, A. Sahm, K. Paschke, R. Güther, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, „SHG Microsystem Light Source at  $488 \text{ nm}$  for Raman Spectroscopy“, Optics Letters 34, 217-219 (2009).

M. Maiwald, H. Schmidt, B. Sumpf, G. Erbert, H.-D. Kronfeldt, G. Tränkle, „ $671 \text{ nm}$  Microsystem Light Source for Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy“, Applied Optics, 48, 2789-2792 (2009).

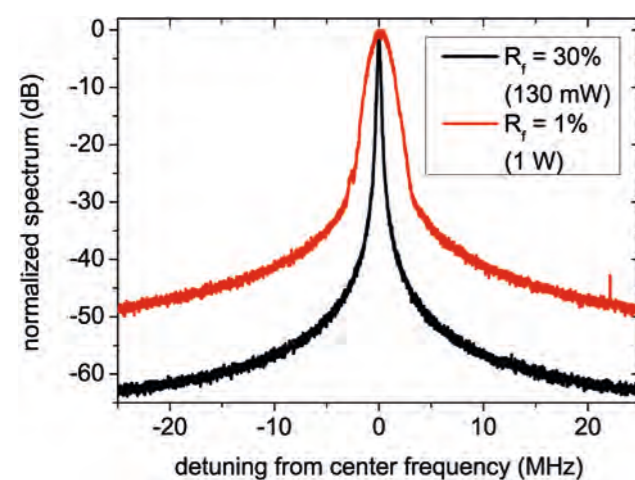
M. Maiwald, H. Schmidt, B. Sumpf, R. Güther, G. Erbert, H.-D. Kronfeldt, G. Tränkle, „Microsystem Light Source at  $488 \text{ nm}$  for Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy“, Applied Spectroscopy 63, 1283-1287, (2009).

M. Maiwald, „Halbleiterlaser basierte Mikrosystemlichtquellen für die Raman-Spektroskopie“, Zugl.: TU Berlin, Univ. Diss., ISBN-10: 3869551844, Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN-13: 9783869551845 (2009).

## DIODENLASER MIT GERINGEN LINIENBREITEN FÜR DIE KOHÄRENTE NACHRICHTENÜBERTRAGUNG UND ATOMSPEKTROSKOPIE MIT HÖCHSTER PRÄZISION

Kohärente Freiraumkommunikation wie auch die Präzisionsspektroskopie haben eine hohe Bedeutung für zukünftige Raumfahrtmissionen. Damit können sowohl Nachrichtenkanäle mit Übertragungsraten im Gbps-Bereich aufgebaut, als auch Zeitmessungen und Messungen von Naturkonstanten mit extrem hoher Präzision durchgeführt werden. Letztere verbessern nicht nur künftige GPS-Systeme, sondern sind auch für die physikalische Grundlagenforschung von herausragendem Wert. Für beide Anwendungen werden effiziente, mechanisch stabile, leistungsstarke und kompakte Laserstrahlquellen mit extrem geringer Linienbreite benötigt. Diese Anforderungen können praktisch nur von Halbleiterdiodenlasern erfüllt werden. Die Forschungsarbeiten des FBH konzentrieren sich dabei darauf, Diodenlaser spektral so gut zu stabilisieren, dass eine extrem geringe Linienbreite im kHz-Bereich erreicht wird. Die Grundfrequenz des Lichtes im spektral relevanten Bereich liegt bei ungefähr 300 THz, das heißt es muss eine Stabilisierung von besser als  $1:10^{10}$  gewährleistet werden. Die Verifikation dieser spektralen Charakteristik setzt seinerseits eine hochpräzise, maßgeschneiderte Messtechnik voraus, da diese geringen Linienbreiten weit unter der Auflösungsgrenze herkömmlicher optischer Spektralanalysatoren liegen.

Zur Bestimmung der Kurzzeit-Linienbreite wurden am FBH ein self-delayed heterodynes und ein heterodynes Messverfahren implementiert, die beide auf einer Schwebungsmessung basieren. Die beste Auflösung wird dabei mit dem heterodynen Verfahren erreicht, bei dem das Licht zweier unabhängiger Laser auf einer Photodiode überlagert wird, so dass ein Schwebungssignal entsteht. Dieses Signal der Photodiode wird mithilfe eines Oszilloskops aufgenommen und per Computer oder mit einem Spektralanalysator direkt ausgewertet.



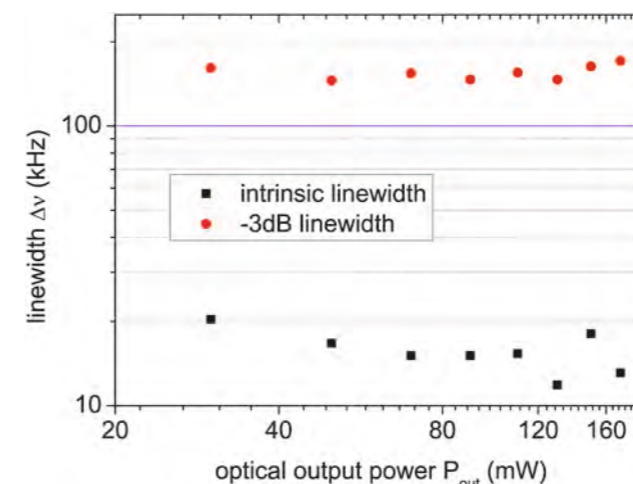
## NARROW LINEWIDTH DIODE LASERS FOR COHERENT COMMUNICATION AND ATOMIC SPECTROSCOPY WITH A MAXIMUM ACCURACY

Coherent free-space communication as well as precision spectroscopy are of major importance for future space missions. With it, communication channels are able to provide data transfer rates in the Gbps range, and precision timekeeping as well as measurements of physical constants with extremely high accuracy can be performed. The latter will not only improve future GPS systems, but is also of great interest for fundamental research. Both applications require efficient, rugged, high-power, and compact laser sources with an extremely narrow spectral linewidth. These demands can only be met in practice by semiconductor diode lasers. Research activities at the FBH concentrate on improving the spectral stability of diode lasers in order to obtain extremely narrow linewidths in the kHz range. Since the fundamental frequency of the light in the spectrally relevant range is roughly 300 THz, a stabilization of better than  $1:10^{10}$  needs to be provided. The verification of narrow linewidth emission implies a highly accurate and customized measurement technique, since linewidths in the kHz range are far below the resolution limit of conventional spectrum analyzers.

The FBH has implemented a self-delayed heterodyne and a heterodyne measurement technique in order to determine the short-term linewidth. Both measurement techniques are based upon a beat note signal measurement. The highest resolution is obtained with the heterodyne measurement technique. Here, the light of two independent lasers is superimposed on a photodiode, whereby a beat note signal is generated. The output signal of the photodiode is either recorded with an oscilloscope and evaluated by a computer, or is directly analyzed with an electrical spectrum analyzer.

Abb. 1: Schwebungssignale von 1060 nm DBR-RW-Lasern mit einer Frontfacetten-Reflektivität von 30% bei 130 mW und von 1% bei 1 W.  
Fig. 1: Beat note signals of 1060 nm DBR-RW lasers with a front facet reflectivity of 30% at 130 mW and 1% at 1 W.

Die Linienbreite von Halbleiterlasern wird hauptsächlich durch spontane Emissionen hervorgerufen. Allerdings vergrößert sich die Linienbreite zusätzlich durch 1/f-Rauschen (Rauschen des Stromtreibers, mechanische Vibrationen, Temperaturrauschen) der Messumgebung (technisches Rauschen). Die Linienform des Schwebungssignals, welche durch spontane Emissionen hervorgerufen wird, entspricht einer Lorentzverteilung (intrinsische Linienbreite). Die Linienform, die durch 1/f-Rauschen hervorgerufen wird, führt zu einer Gaußverteilung. Durch Anpassen eines Voigtprofils, d.h. einer Faltung aus Lorentz- und Gaußprofil an das Schwebungssignal, können intrinsisches und technisches Frequenzrauschen getrennt werden. Die -3 dB-Breite (Halbwertsbreite) hingegen beschreibt die spektrale Stabilität der Laser unter Berücksichtigung aller Rauschquellen.



The linewidth of semiconductor lasers is mainly determined by spontaneous emission events. However, the lineshape is further broadened by 1/f noise (noise of the current driver, mechanical vibrations, temperature noise) of the measurement setup (technical noise). The lineshape of the beat note signal attributed to spontaneous emission events, corresponds to a Lorentzian (intrinsic linewidth) distribution, whereas the lineshape due to 1/f noise yields a Gaussian distribution. The intrinsic and the technical frequency noise can be separated by fitting a Voigt profile (convolution of a Lorentzian and a Gaussian) to the beat note signal. The -3 dB linewidth (full width at half maximum) is a measure of the spectral stability including both noise sources.

Abb. 2: Linienbreite vs. Ausgangsleistung eines 1060 nm DBR-RW-Lasers mit  $R_f = 30\%$ .  
Fig. 2: Linewidth vs. optical output power of a 1060 nm DBR-RW laser with  $R_f = 30\%$ .

Das FBH hat Diodenlaser mit sehr geringer Linienbreite bei gleichzeitig hoher Ausgangsleistung entwickelt. In Abb. 1 sind Schwebungssignale von DBR-RW-Lasern mit verschiedenen Frontfacetten-Reflektivitäten abgebildet. Bei einer Frontfacetten-Reflektivität von 1% wird eine Ausgangsleistung von einem Watt bei gleichzeitig geringer -3 dB-Linienbreite von 1200 kHz (intrinsisch: 16 kHz) auf einer Zeitskala von 100  $\mu$ s erreicht. Noch geringere Linienbreiten lassen sich durch eine höhere Verspiegelung der Frontfacette erzielen. In Abb. 2 ist eine Linienbreitenmessung eines DBR-RW-Lasers über der Ausgangsleistung dargestellt. Die -3 dB-Linienbreite ist über den gesamten Messbereich nahezu konstant und beträgt etwa 150 kHz. Die minimale intrinsische Linienbreite beträgt 12 kHz bei einer Ausgangsleistung von 130 mW. Diese Linienbreiten in Kombination mit der hohen Leistung sind für monolithische Diodenlaser die besten Werte in Bezug auf spektrale Reinheit und Stabilität, über die in der Literatur berichtet wurde.

The FBH has developed diode lasers that provide a very small spectral linewidth combined with high output power. Fig. 1 displays beat note signals of DBR-RW lasers with various front facet reflectivities. An output power of 1 Watt and a linewidth as narrow as 1200 kHz (intrinsic linewidth: 16 kHz) on a time scale of 100  $\mu$ s is obtained for a front facet reflectivity of 1%. Even narrower linewidths can be realized with higher front facet reflectivities. Fig. 2 displays a linewidth measurement of a DBR-RW laser in dependence on the optical output power. The -3 dB linewidth remains almost constant at 150 kHz throughout the entire measurement range. The minimum intrinsic linewidth is 12 kHz at an output power of 130 mW. Such a combination of narrow linewidth and high output power together with high spectral purity has not been previously demonstrated in published literature.

## Veröffentlichungen // Publications

S. Spießberger, M. Schiemangk, A. Wicht, G. Erbert, „Compact narrow linewidth laser sources for coherent optical communication“, Laser Optics Berlin (2010).

## MIKROBANK ZUR ERZEUGUNG VON KURZEN OPTISCHEN PULSEN MIT FREI WÄHLBARER FOLGEFREQUENZ

Eine Vielzahl von Applikationen erfordert die Bereitstellung von sehr kurzen optischen Pulsen bis hinein in den Femtosekunden-Bereich mit geringer Folgefrequenz bis zu 100 MHz. Anwendungen finden sich unter anderem in der Lasermaterialbearbeitung, der Photo- und Displaytechnik, bei biomedizinischen Untersuchungen auf der Basis der Fluoreszenzspektroskopie, Laserentfernungsmessungen, LIDAR sowie in der optischen Analytik. Da übliche Kurzpulslasersysteme Pulse mit hoher Folgefrequenz erzeugen, benötigt man schnelle optische Modulatoren (Pulspicker), die in der Lage sind, aus den schnellen Pulszügen einzelne Pulse zu selektieren, d.h. eine Frequenzteilung zu erreichen. Zur Pulsselektion werden üblicherweise Pockelszellen, akusto-optische und elektro-optische Modulatoren oder elektro-optische Lichtmodulatoren auf Wellenleiterbasis eingesetzt. Alle diese Anordnungen haben den Nachteil, dass sie groß, teuer und in der Auskoppelfrequenz begrenzt sind.

Eine neue ps-Lichtquelle mit integriertem Pulspicker für die Selektion von Einzelpulsen aus den hochfrequenten Pulsfolgen modengekoppelter Laser wurde am FBH entwickelt. Das Konzept nutzt dabei sowohl ein maßgeschneidertes Design für die Lichtführung aus der Hochleistungs-Diodenlasertechnologie als auch optimierte HF-Komponenten der GaN-Elektronik in innovativem Schaltungsdesign. Die Anordnung besteht aus einem 1 cm langen 4-Sektions-DBR-Laser (master oscillator), der mittels Modenkopplung sehr kurze optische Pulse mit einer Halbwertsbreite von 10 ps und einer Folgefrequenz von ~4,3 GHz erzeugt und einem aus zwei Sektionen bestehenden Trapezbauelement (pulse picker element), das zur Pulsselektion und Verstärkung benutzt wird (siehe Abb.1).

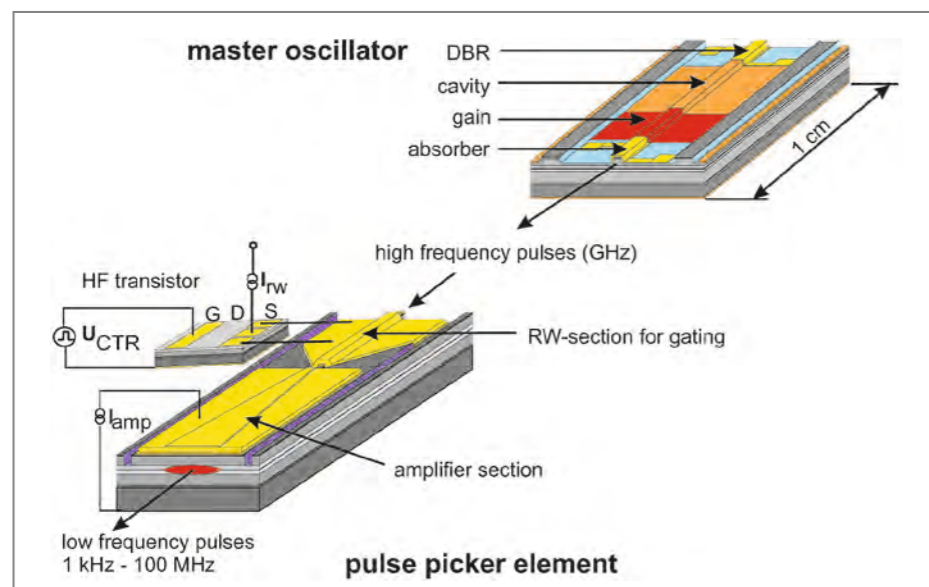


Abb. 1: Am FBH entwickeltes Konzept für die Selektion von Einzelpulsen.  
Fig. 1: New concept developed by the FBH to selectively pick out optical pulses.

## MICROBENCH FOR ULTRA-SHORT PULSE GENERATION WITH ARBITRARY REPETITION FREQUENCY

A variety of applications require ultra-short optical pulses down to the femtosecond or picosecond range with repetition rates up to 100 MHz. Applications are in e.g. material processing, display technology, biomedical investigations such as fluorescence spectroscopy, metrology, LIDAR measurements as well as in optical analytics. Conventional short-pulse laser systems based on mode locking generate optical pulses in the GHz or high MHz range. To reduce the repetition rate, pulse pickers are used to selectively pick off pulses and reduce the repetition frequency. Common pulse picker techniques are Pockels cells, acousto-optical modulators, electro-optical modulators and integrated optical Mach-Zehnder modulators on the basis of optical fibers. The disadvantages of these systems are their relatively large size, high bias voltage and the limitation range of achievable modulation frequency to pick out the pulses.

A new ps light source with integrated pulse picker to select fs and ps pulses from high-frequency pulse trains of mode locked lasers has been developed at the FBH. This concept uses both, a tailored design for beam guiding based on FBH's high-power diode laser technology and optimized RF components with an innovative GaN technology circuit design. The FBH module consists of a 1 cm long monolithic 4-section DBR master oscillator which generates ultra-short light pulses < 10 ps with a repetition rate of ~4.3 GHz and a 2-section tapered element (pulse picker), using the ridge waveguide RW-section acting as an optical gate and the tapered section for amplification (see Fig. 1).

Durch einen ultraschnellen GaN-High-Electron-Mobility-Transistor (HEMT) mit geringer Kapazität und großer Stromdichte, der auch am FBH entwickelt und hergestellt wurde, kann nun die Ridge-Waveguide (RW)-Sektion durch Anlegen eines Stromimpulses transparent geschaltet werden. Die durchgelassenen optischen Pulse werden in einer Trapez-Sektion verstärkt. Liegt kein elektrischer Impuls an der RW-Sektion an, werden die ankommenden Pulse absorbiert, sodass die Pulswiederholrate frei wählbar verringert werden kann.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel für die Funktionsweise. Die eingekoppelten Pulse haben eine Folgefrequenz von 4,33 GHz, von denen einzelne im Pulspickerelement herausselektiert werden. Dadurch reduziert sich hier die Folgefrequenz auf 67 MHz. Eine besondere Herausforderung dieser Anordnung ist, dass das An- und Ausschalten der Stromimpulse sehr schnell sein muss (ca. 100 ps).

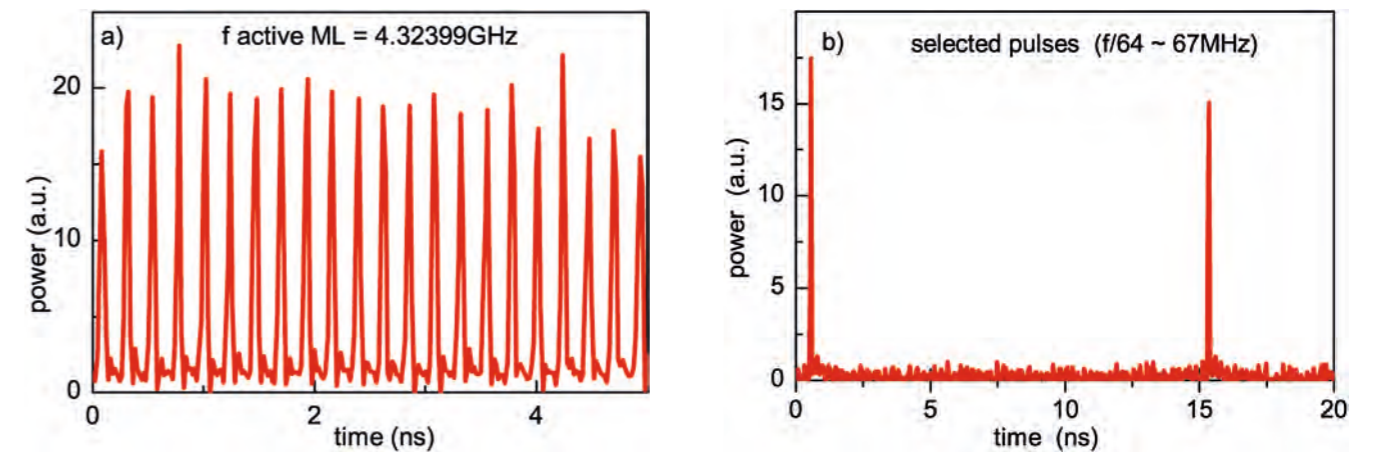


Abb. 2: Beispiel für die Selektion von Picosekundenpulsen.  
Fig. 2: Example for selected ps pulses with the FBH micro bench.

Um die Induktivitäten zu minimieren, wurden die HF-Ansterelektronik und das Pulspickerelement sehr dicht aneinander angeordnet. Hierzu wurde im FBH eine optoelektronische Mikrobank entwickelt, auf der sowohl die Optoelektronik (Masteroszillator und Pulspickerelement), als auch die Auskoppeloptiken und die hochfrequente elektronische Ansteuerung integriert sind. Auf diese Weise ist ein kompaktes Modul auf rein halbleitertechnologischer Basis entstanden, das ultrakurze Lichtimpulse < 10 ps mit nahezu beliebigen Folgefrequenzen bereitstellen kann (Abb. 3). Die ps-Lichtquelle mit integriertem Pulspicker vereint damit HF-Technologie und Elektronik mit der Hochleistungsdiodenlaser-Entwicklung, beides sind Kernkompetenzen des FBH.

Without electrical pulses, the RW section is absorptive. By using an ultra-fast high frequency GaN high-electron mobility transistor (HEMT) with low capacitances and high current density, which has also been developed at the FBH, the ridge waveguide section can be biased to transparency by applying a current pulse. As the tapered section is used for amplification of the previous pulses, selective pulse picking with free choice of the pulse repetition frequency can be achieved.

Fig. 2 shows the mode of operation. From the 4.32 GHz optical pulses, single pulses are picked out and amplified thus reducing the repetition frequency to 67 MHz in this case. A particular challenge is the switching-on and off (~100 ps) of the RW section with fast current pulses.

To minimize the inductances, the final stage HF transistor has been positioned as close as possible to the pulse picker element to ensure fast switching behavior. As a consequence, a micro bench has been developed at the FBH, integrating optoelectronics (master oscillator and pulse picker element), driver electronic stage as well as optical lenses for laser beam shaping. Thus, a compact module completely based on semiconductor technology has been produced that provides ultra-short light pulses < 10 ps with almost any desired repetition rate (see Fig. 3). The ps light source with integrated pulse picker thus ideally combines RF technology and electronics with high-power diode lasers – both of which are core competencies of the Ferdinand-Braun-Institut.

## GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

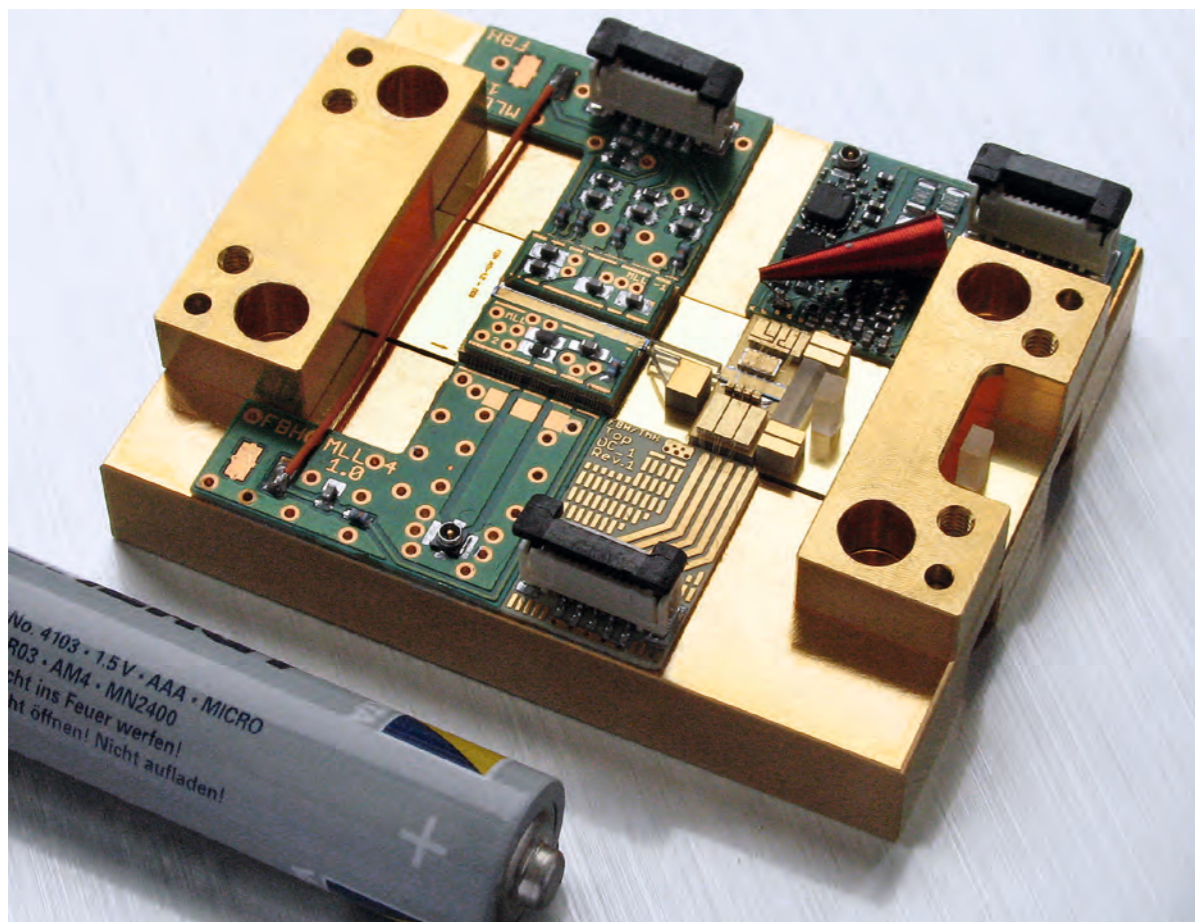


Abb. 3: Optoelektronische Mikrobank zur Pulsselektion.  
Fig. 3: Optoelectronic micro bench for pulse picking.

### Veröffentlichungen // Publications

A. Klehr, A. Liero, T. Hoffmann, S. Schwertfeger, H. Wenzel, G. Erbert, W. Heinrich, G. Tränkle, „Pulse picking from 4 GHz pulse trains generated by mode locking of 1cm-long monolithic 1060nm DBR Lasers”, SPIE Photonics West, 7616-13 (2010).

A. Liero, A. Klehr, S. Schwertfeger, T. Hoffmann, W. Heinrich, „Laser Driver Switching 20 A with 2 ns Pulse Width Using GaN”, accepted for IMS, Anaheim (2010).

## GAN-OPTOELEKTRONIK

Im Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik gilt das Hauptaugenmerk der Entwicklung innovativer Lichtquellen auf Basis des Materialsystems AlN-GaN-InN. Der zugängliche Wellenlängenbereich umfasst das komplette sichtbare Wellenlängenspektrum und reicht bis ins ferne Ultraviolett (UV) bzw. nahe Infrarot. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf drei Klassen von Bauelementen: Hochleistungslaser mit einer Emissionswellenlänge um 400 nm, Laserdioden im blauen und grünen Spektralbereich sowie Leuchtdioden (LEDs) im nahen und fernen UV. Diese Lichtquellen zielen auf unterschiedliche Einsatzbereiche. Während Hochleistungslaser z. B. für die holografische Datenspeicherung und blau-grüne Laser für spektroskopische Anwendungen oder die Displaytechnologie interessant sind, sollen LEDs im fernen UV u. a. zur Wasserdesinfektion eingesetzt werden.

Die Aktivitäten umfassen die gesamte Wertschöpfungskette, angefangen von der Modellierung und Simulation der Bauelemente sowie der Schichtstrukturherstellung mittels Metallorganischer Gasphasen-Epitaxie (MOVPE), über die Chiptechnologie bis hin zur Montage der Bauelemente und deren elektrooptischer Charakterisierung. Dabei arbeitet das FBH eng mit der Arbeitsgruppe Experimentelle Nanophysik und Photonik der TU Berlin zusammen. Auf Basis dieser engen Verbindung von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung beteiligt sich das FBH an der Etablierung eines europäischen Kompetenzzentrums für die GaN-Optoelektronik in Berlin.

Im Jahr 2009 konnten eine Vielzahl von qualitativen wie quantitativen Fortschritten auf dem Gebiet der Materialentwicklung und der Bauelementeherstellung erreicht werden. Zu den Höhepunkten gehörten die Realisierung lateral monomodiger Rippenwellenleiterlaser mit einer Wellenlänge um 400 nm und Ausgangsleistungen von 50 mW im cw-Betrieb sowie die Demonstration optisch gepumpter InGaN-Laserstrukturen mit niedrigen Schwellenleistungsdichten bei Emissionswellenlängen bis 465 nm. Wesentliche Fortschritte gab es bei der Entwicklung der Fabrikationstechnologien von Laserdioden auf unpolarem und semipolarem GaN (z.B. die Realisierung gespaltener und geätzter Facetten) und beim Verständnis darum, wie die Resonatorausrichtung auf nichtpolaren und semipolaren GaN-Laserstrukturen den Gewinn und die Polarisation der stimulierten Emission beeinflusst. Darüber hinaus konnten UV-LEDs, die spektral sauber um 320 nm emittieren, realisiert und ein erstes Wasserdesinfektionsmodul basierend auf UVC-LEDs demonstriert werden. Mit der Einrichtung des lokalen Wachstumskerns Berlin WideBaSe wurde die Basis für eine langfristig enge Kooperation auf dem Gebiet der GaN-Optoelektronik zwischen dem FBH und anderen öffentlichen sowie industriellen Einrichtungen aus Berlin geschaffen.

## GAN OPTOELECTRONICS

The main focus of the Business Area GaN Optoelectronics is on the development of innovative light sources based on the material system AlN-GaN-InN. The accessible wavelength range includes the whole visible spectrum extending further to the far ultraviolet (UV) and the near infrared. Research and development aim at three classes of devices: high-power diode lasers with an emission wavelength of 400 nm, diode lasers in the blue and green spectral region and light emitting diodes (LED) in the near and far UV. These light sources target different application areas. Whereas high-power 400 nm lasers and blue-green lasers are interesting for holographic data storage as well as the use in spectroscopy and display technology, LEDs in the far UV are developed e.g. for the use in water disinfection.

Activities comprise the whole value chain including modeling and simulation of the devices, fabrication of layer structures by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE), processing and mounting of chips as well as electro-optical characterization of the devices. All work is executed in close collaboration with the Experimental Nanophysics and Photonics Group at TU Berlin. Combining basic research and practical applications, FBH participates in establishing a European center of competence for GaN optoelectronics in Berlin.

In 2009, substantial qualitative and quantitative progress was achieved in material development and device fabrication. Amongst the highlights of the year were the demonstration of single-lateral mode ridge waveguide lasers with a wavelength around 400 nm and an optical output power of 50 mW under cw operation as well as the realization of InGaN laser structures which emit at 465 nm under low-power optical pumping. Fabrication technologies of laser diodes on nonpolar and semipolar GaN such as cleaving and etching of laser facets have been further advanced. Moreover, both experimental and theoretical studies have deepened FBH's understanding of how the alignment of the resonator on nonpolar and semipolar GaN laser structures influences gain and polarization of stimulated emission. As for UV LEDs, a spectrally clean emission at 320 nm was achieved and a first generation UVC LED water disinfection module was successfully demonstrated. By establishing Berlin WideBaSe as a regional center of economic growth additionally lays the foundations for a long-term collaboration in the GaN optoelectronics field between FBH, universities, public research institutions, and companies in Berlin.

## WASSERDESINFEKTION MIT GAN-BASIERTEN UV-LEDS

Ein wichtiger Anwendungsbereich für Leuchtdioden (LEDs), die im fernen ultravioletten Spektralbereich (UVC) emittieren, ist die Wasserdesinfektion und die Trinkwasseraufbereitung. LEDs haben dabei viele Vorteile gegenüber den gängigen Niederdruck-Quecksilberdampflampen, die heute im Einsatz sind. Sie benötigen keine Aufwärmphase, sind sehr kompakt, robust und können mit geringen Spannungen betrieben werden, so dass sie beispielsweise in mobilen solarbetriebenen Anlagen einsetzbar sind.

Um die Funktionalität von LEDs für solche Anwendungsgebiete zu demonstrieren, hat das FBH in Zusammenarbeit mit der TU Berlin ein Wasserdesinfektionsmodul mit UVC-LEDs als Lichtquelle entwickelt. Aufgrund der heutzutage noch geringen Lichtleistung der UVC-LEDs wurde für das Modul ein Array aus 33 LEDs (eine LED/cm<sup>2</sup>) mit einer Wellenlänge von 268 nm gewählt, welches zudem eine möglichst homogene Ausleuchtung erlaubt. Über das Array wurde eine Petrischale aus synthetischem Quarzglas mit einer Rührereinheit platziert. Nach den ersten erfolgreichen bioanalytischen Tests wurde ein zweites, kompakteres Modul entwickelt (Abb. 1). Hier wurden LEDs mit einer Emissionswellenlänge von 282 nm als konzentrisches Array angeordnet, so dass mit einem zusätzlichen Aufsatz erste Untersuchungen von fließendem Wasser möglich waren.

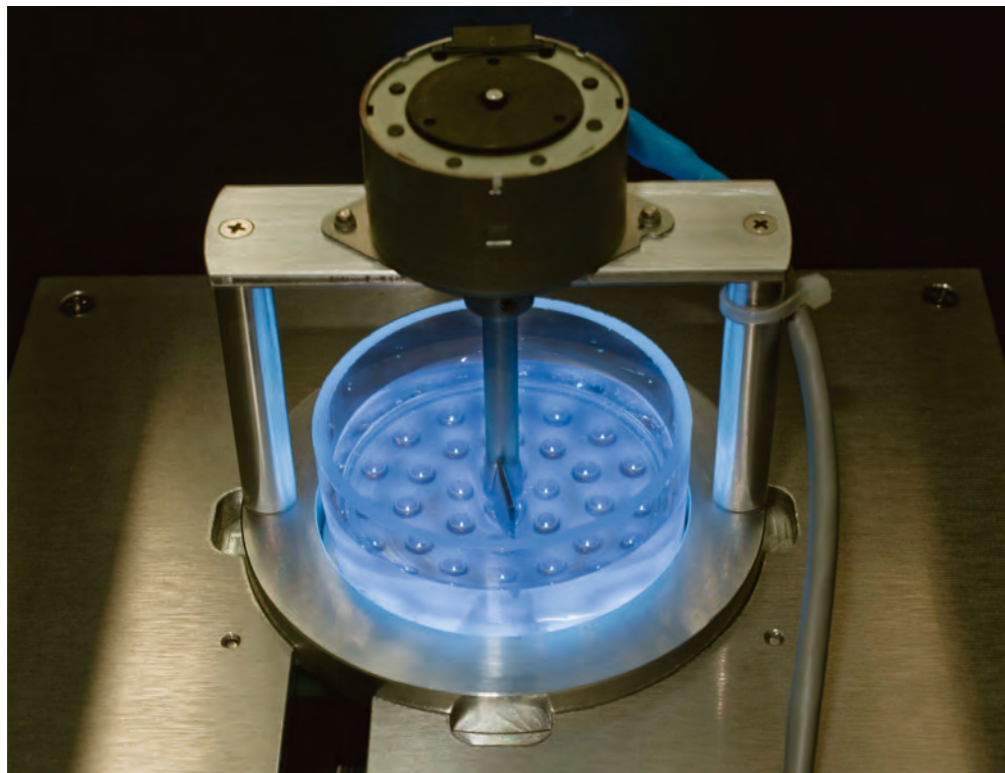


Abb. 1: Wasserdesinfektionsmodul.  
Fig. 1: Water disinfection module.

## WATER DISINFECTION WITH GAN-BASED UV LEDs

The disinfection of drinking water is a very important application field for light emitting diodes (LEDs) with emission wavelengths in the deep ultraviolet (UV) spectral range. Compared to low-pressure mercury lamps which are presently used for this purpose, LEDs have many advantages. LEDs do not require warm-up times, they are very compact and robust and can be driven with low voltages when used for example in mobile, solar or battery powered systems.

To demonstrate the functionality of UV LEDs for those applications, FBH in collaboration with TU Berlin has developed water disinfection modules with UVC LEDs as light sources. Due to the low output power of today's commercial UVC LEDs, an array of 33 LEDs (approximately one LED/cm<sup>2</sup>) emitting at 268 nm was used providing an almost homogeneous irradiation of the water container. A Petri dish composed of synthetic quartz glass and a stirrer unit were placed on top of the LED array. After successfully completing the first bioanalytical tests, a more compact second generation module was developed as shown in Fig. 1. Here, UV LEDs emitting at 282 nm were arranged concentrically which allowed to perform first tests with flowing water by using a special flow-through module adapter set-up.

Für die biosimetrischen Tests wurde Wasser in verschiedenen Qualitäten mit Bacillus-Subtilis-Sporen versetzt. 30 ml dieser Testflüssigkeit wurden dann in dem Desinfektionsmodul mit UVC-Licht bestrahlt und jeweils eine Probe von 2 ml nach verschiedenen Zeiten genommen. Abb. 2 zeigt das Testergebnis für deionisiertes Wasser, wobei die logarithmische Reduktion der Sporen über der Bestrahlungsstärke für drei verschiedene Messreihen dargestellt ist. Nach einer Bestrahlung mit 400 J/m<sup>2</sup> (oder nach 248 s) wurde die geforderte Reduktion der Sporen um vier Größenordnungen erreicht. Die Tests zeigten auch, dass die Deaktivierung von Bacillus-Subtilis-Sporen mit UVC-LEDs effizienter ist als die mit herkömmlichen Niederdruck-Quecksilberdampflampen, deren Reduktionsrate bei vergleichbarer Dosis um eine Größenordnung geringer ausfällt.

Die generelle Einsatzfähigkeit von UVC-LEDs im Bereich der Wasserdesinfektion konnte somit für kleine Wassermengen nachgewiesen werden. Für einen praktikablen Einsatz bei der Wasserdesinfektion müssen die Lichtleistung und die Effizienz der UV-LEDs noch weiter steigen. Dennoch sind UVC-LEDs eine vielversprechende Alternative zu Niederdruck-Quecksilberdampflampen in Wasserdesinfektionsmodulen der Zukunft.

For biosimetry testing, Bacillus subtilis spores were added to water of different qualities. 30 ml of the test fluid was irradiated with UVC light in the water disinfection module, and 2 ml samples were taken after different irradiation times. Fig. 2 shows the logarithmic reduction factor of the spore concentration in deionized water as a function of the irradiation dose for three series of measurements. The targeted reduction of spores by four orders of magnitude was achieved after an irradiation dose of 400 J/m<sup>2</sup> (i.e. after 248 s). These tests demonstrated that deactivating Bacillus subtilis spores with UVC LEDs is actually more efficient as with conventional low pressure mercury lamps whose reduction rate was smaller by one order of magnitude for the same dose.

The general applicability of UVC LEDs for the disinfection of water was successfully demonstrated for small water quantities. For real-world application of UV LEDs in water purification, the output powers and efficiencies need to be further improved. Nevertheless, UVC LEDs are a promising alternative to low pressure mercury lamps in water disinfection modules in the future.

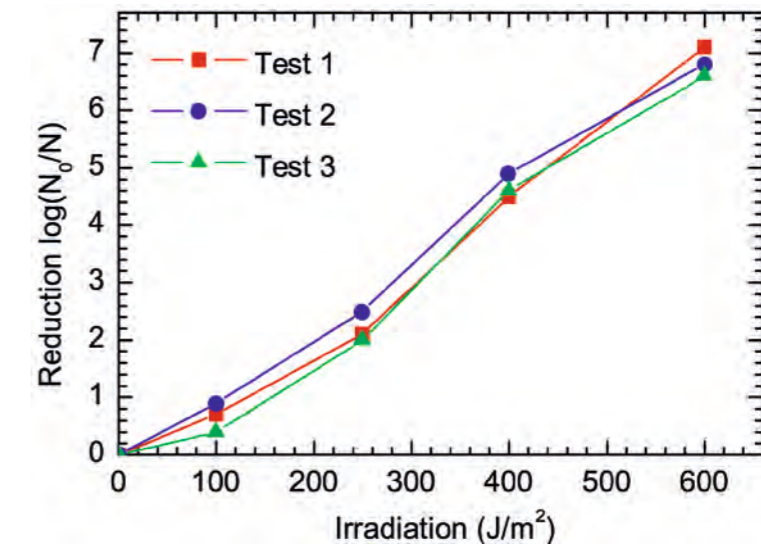


Abb. 2: Inaktivierung der Bacillus-Subtilis-Sporen (Modul der zweiten Generation).  
Fig. 2: Deactivation of the Bacillus subtilis spores (generation 2 module).

## Veröffentlichungen // Publications

M. Kneissl, T. Kolbe, N. Lobo, J. Stellmach, A. Knauer, V. Küller, H. Rodriguez, S. Einfeldt and Markus Weyers, „Deep UV nitride-based light emitting diodes – applications and challenges“, Proceedings of the 6<sup>th</sup> China International Forum on Solid State Lighting (2009).

## ERHÖHTE LICHTEXTRAKTION IN UV-LEDS MIT NANOPIXEL-KONTAKTEN

Die effiziente Extraktion des Lichts spielt eine wichtige Rolle bei der Optimierung Nitrid-basierter ultravioletter (UV) Leuchtdioden (LEDs). Für LEDs, die im nahen UV emittieren, wurde bereits gezeigt, dass die Verwendung von Mikropixel-LEDs oder ungerichtete Reflektoren mit Mikrokontakten die optische Ausgangsleistung erhöhen können. Im tieferen UV-Spektralbereich ist die Herstellung transparenter oder reflektierender Ohmscher Kontakte auf p-AlGaIn allerdings sehr schwierig. Aluminium ist zwar ein guter Reflektor im gesamten UV, bildet jedoch keinen Ohmschen Kontakt auf p-AlGaIn. Palladium führt auf p-AlGaIn zwar zu einem Ohmschen Kontakt mit geringem Widerstand, ist aber im UV weder transparent noch hoch reflektierend.

Zur besseren Lichtextraktion wurde daher ein neuartiges Nanopixel-LED-Design entwickelt, das aus einer zwei-dimensionalen Matrix von Pd-Nanopixel-Kontakten und einem Al-Reflektor besteht. Abb. 1 zeigt eine schematische Querschnittsansicht der Struktur. Ist der Abstand zwischen den Nanopixeln ausreichend klein, fließt infolge der Strompfadaufweitung in der p-dotierten Schicht ein Großteil des Stroms in den Bereich zwischen den Nanopixeln. Dies führt zu einer nahezu homogenen Strominjektion in den aktiven Bereich der gesamten Mesa-Struktur. Die Al-Schicht reflektiert das im Bereich zwischen den Nanopixeln emittierte Licht stark und erhöht somit die Lichtextraktion. Um die Effizienz zu maximieren, müssen sowohl die Größe ( $l$ ) als auch der Abstand ( $d$ ) der Nanopixel optimiert werden. Die Simulationen der Strompfadaufweitung für eine UV-LED in Abb. 2 zeigen, dass bei einer 200 nm dicken p-GaN-Schicht ein Abstand von 1  $\mu\text{m}$  oder weniger zwischen den Nanopixeln erforderlich ist, um eine Lichtemission aus dem gesamten aktiven Bereich zu erhalten.

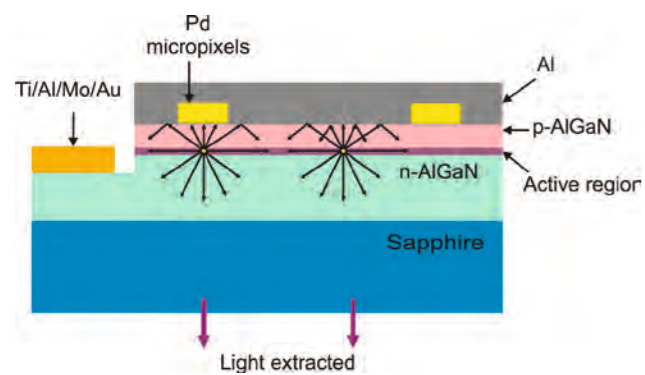


Abb. 1: Schematische Querschnittsansicht einer Nanopixel-UV-LED.  
Fig. 1: Schematic cross-sectional view of a nanopixel UV LED.

## ENHANCEMENT OF LIGHT EXTRACTION IN UV LEDs USING NANOPIXEL CONTACT DESIGN

The extraction of light is an important issue for the optimization of nitride-based ultraviolet (UV) light-emitting diodes (LEDs). Several methods such as the use of micropixel LEDs and omnidirectional reflectors with microcontacts have been shown to result in enhanced light output from near-UV LEDs. When moving deeper into the UV region, transparent or reflective ohmic contacts to p-AlGaIn are difficult to fabricate. Aluminum is a good reflector in the entire UV spectrum; however, it does not form an ohmic contact to p-doped AlGaIn. Palladium, on the other hand, results in low resistance ohmic contacts but is not transparent and has a low reflectivity in the UV spectral range.

A novel nanopixel LED design is proposed to enhance the light extraction in UV LEDs using a two-dimensional array of Pd nanopixel contacts and an Al reflector. A schematic cross-sectional view of the structure is shown in Fig. 1. If the spacing between the nanopixels is sufficiently small, a large portion of the current will flow into the region between the nanopixels due to current spreading in the p-doped layer. This results in the almost homogenous injection of current throughout the entire active region of the mesa structure. Light emitted in the region between the nanopixels will be efficiently reflected by the Al layer enhancing the light extraction efficiency. Hence, optimization of both the size ( $l$ ) and spacing ( $d$ ) between the nanopixels is necessary to maximize the light output. As seen in Fig. 2, current spreading simulations in an UV LED reveal that for a 200 nm thick p-GaN layer, 1  $\mu\text{m}$  or less spacing between the nanopixels is required to obtain light emission from the entire region.

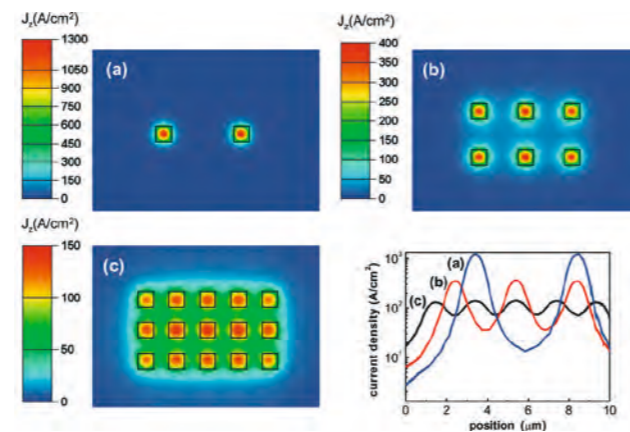
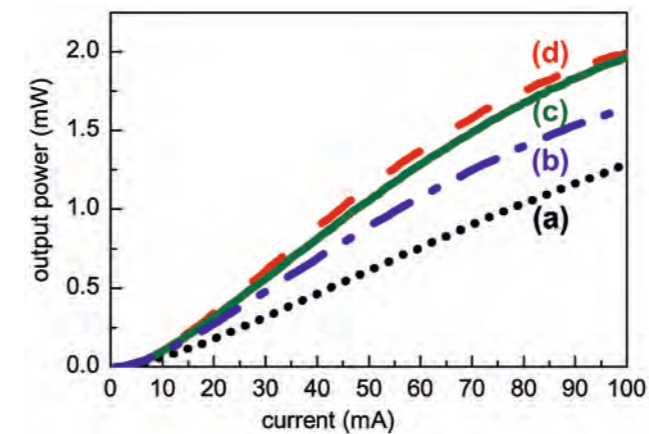


Abb. 2: Simulation der Strominjektion in den aktiven Bereich für eine Nanopixel-AlGaIn-LED mit  $l = 1 \times 1 \mu\text{m}^2$  und  $d =$  (a) 4  $\mu\text{m}$ , (b) 2  $\mu\text{m}$  sowie (c) 1  $\mu\text{m}$ . Der Gesamtstrom ist konstant. In dem Graphen ist die injizierte Stromdichte als Funktion der Position entlang einer Linie durch das Zentrum der Nanopixel für verschiedene Strukturen dargestellt.

Fig. 2: Simulation of the current injection in the active region for nanopixel AlGaIn LEDs with  $l = 1 \times 1 \mu\text{m}^2$  and  $d =$  (a) 4  $\mu\text{m}$ , (b) 2  $\mu\text{m}$  and (c) 1  $\mu\text{m}$ . The total current is constant. In the graph the injection current density as a function of the position along a line through the center of the nanopixels is shown for the different structures.

Es wurden LEDs mit Pd-Nanopixel-Kontakten und einer Al-Reflektorschicht hergestellt, die im nahen UV bei 390 nm emittieren. In Abb. 3 sind deren L-I-Charakteristiken mit verschiedenen Nanopixel-Größen und -Abständen aber identischem Füllfaktor (Pd-Kontaktfläche / Mesafläche) von 25% dargestellt und werden mit einer LED mit einem konventionellen großflächigen  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  Kontakt (100% Füllfaktor) verglichen. Die Lichtausgangsleistung steigt wenn Größe und Abstand der Nanopixel abnehmen. Bei 20 mA zeigen die Nanopixel-LEDs mit Nanopixel-Größen von  $4 \times 4$ ,  $2 \times 2$  und  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  eine um 55, 78 bzw. 90% höhere Ausgangsleistung als die LED mit dem großflächigen Kontakt.

Im tiefen UV-Spektralbereich, wo transparente oder reflektierende Ohmsche Kontakte schwierig herzustellen sind, ist das Nanopixel-Kontaktdesign eine exzellente Möglichkeit, um die Lichtextraktion zu erhöhen.



Nanopixel AlGaIn LEDs emitting at 390 nm with Pd nanopixel contacts and an Al reflector layer were fabricated. L-I characteristics for nanopixel LEDs with different nanopixel sizes and spacings but identical fill factor of 25%, along with a conventional  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  square contact LED are shown in Fig. 3. It is found that the light output increases with decreasing nanopixel size and spacing. At 20 mA the nanopixel LEDs with nanopixel sizes of  $4 \times 4$ ,  $2 \times 2$  and  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  show an increase of 55, 78 and 90% in the light-output power, respectively, compared to the conventional square contact.

In the deep UV region, where transparent or reflective ohmic contacts are difficult to fabricate, the nanopixel contact design will be an excellent technique to enhance light extraction.

Abb. 3: DC L-I-Charakteristiken von Nanopixel-AlGaIn-LEDs mit (a) quadratischem Kontakt ( $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ) (b)  $l = 4 \times 4 \mu\text{m}^2$ ,  $d = 4 \mu\text{m}$  (c)  $l = 2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ,  $d = 2 \mu\text{m}$  und (d)  $l = 1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ .  
Fig. 3: DC L-I characteristics of nanopixel AlGaIn LEDs with (a) square contact ( $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ) (b)  $l = 4 \times 4 \mu\text{m}^2$ ,  $d = 4 \mu\text{m}$  (c)  $l = 2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ,  $d = 2 \mu\text{m}$  and (d)  $l = 1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ .

## Veröffentlichungen // Publications

N. Lobo, H. Rodriguez, A. Knauer, M. Hoppe, S. Einfeldt, P. Vogt, M. Weyers, M. Kneissl, „Enhancement of light extraction in ultraviolet light-emitting diodes using nanopixel contact design with Al reflector”, Appl. Phys. Lett. 96, 081109 (2010).

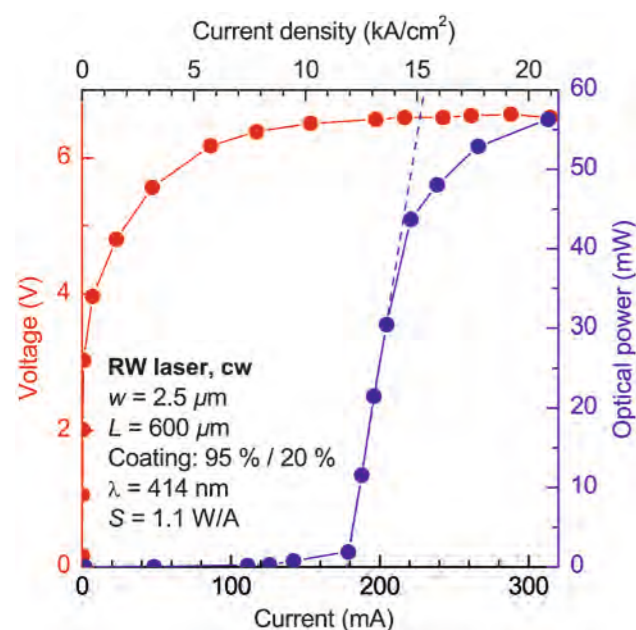
A. Knauer, T. Kolbe, S. Einfeldt, M. Weyers, M. Kneissl and T. Zettler, „Optimization of InGaN/(In,Al,Ga)N based near UV-LEDs by MQW strain balancing with in-situ wafer bow sensor”, phys. stat. sol. (a) 206, 211-214 (2009).

T. Kolbe, A. Knauer, H. Wenzel, S. Einfeldt, V. Küller, P. Vogt, M. Weyers and M. Kneissl, „Emission characteristics of InGaN multi quantum well light emitting diodes with differently strained InAlGaIn barriers”, phys. stat. sol. (c) 6, No. S2, S889-S892 (2009).

A. Knauer, F. Brunner, T. Kolbe, V. Küller, H. Rodriguez, S. Einfeldt, M. Weyers and M. Kneissl, „MOVPE growth for UV-LEDs”, Proc. of SPIE 7231, 72310G (2009).

## RIPPENWELLENLEITER-DIODENLASER AUF DER BASIS VON GAN (0001)

GaN-basierte Halbleiterdiodenlaser haben sich in der letzten Dekade enorm weiterentwickelt. Allerdings beschränken sich die kommerziell verfügbaren Diodenlaser auf nur wenige Emissionswellenlängen (375, 405, 450 und 488 nm). Für viele Spezialanwendungen wie zum Beispiel in der Atom- und der Fluoreszenzspektroskopie werden hingegen zahlreiche weitere Wellenlängen zwischen 390 und 450 nm benötigt. Diodenlaser mit hoher Ausgangsleistung in diesem Spektralbereich sind zudem für neuartige Anwendungen wie die holografische Datenspeicherung interessant. Das Ferdinand-Braun-Institut arbeitet daran, Diodenlaser auf der Basis von GaN nach den spezifischen Vorgaben von Anwendern zu entwickeln. Dazu werden gegenwärtig alle notwendigen technologischen Prozessschritte anhand von Rippenwellenleiter- und Breitstreifen-Diodenlasern mit einer Emission bei 405 nm etabliert. Mittelfristig soll der Wellenlängenbereich auf 390 nm bis 450 nm ausgedehnt und langfristig eine Wellenlängenstabilisierung durch monolithisch-integrierte Gitter (DFB- und DBR-Laser) entwickelt werden.



## RIDGE WAVEGUIDE DIODE LASERS BASED ON GAN (0001)

Semiconductor diode lasers based on GaN have considerably improved over the last decade. However, commercially available devices are restricted to only a few wavelengths (i.e. 375, 405, 450 and 488 nm). For numerous applications like in atom and fluorescence spectroscopy, additional wavelengths between 390 and 450 nm are needed. High-power diode lasers operating in this spectral range are also interesting for novel applications such as holographic data storage. The Ferdinand-Braun-Institut develops custom GaN-based diode lasers. At present all required technological procedures for the fabrication of ridge waveguide (RW) and broad area (BA) diode lasers emitting at 405 nm have been established. In the medium term the wavelength range will be extended to 390 - 450 nm and in the long term a wavelength stabilization by monolithically integrated gratings (DFB and DBR lasers) is projected to be developed.

Abb. 1: Leistung-Spannung-Strom-Kennlinien einer RW-Laserdiode im cw-Betrieb.  
Fig. 1: Optical power-current-voltage characteristics of a RW diode laser under cw operation.

Die Laser-Heterostrukturen werden mit Hilfe der Metallorganischen Gasphasenepitaxie auf 2-Zoll-GaN-(0001)-Substraten abgeschieden und beinhalten u. a. eine  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ -Multiquantenfilmstruktur, eine  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Elektronenstopperschicht zur Reduktion von Leckströmen und eine  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Wellenleiterstruktur. Zahlreiche Einzelschritte der Chipprozessierung wie etwa die Herstellung niederohmiger elektrischer Kontakte auf p-Typ GaN, die Strukturierung von Rippenwellenleitern (RWs) mit einer Rippenbreite von 1,5  $\mu\text{m}$  sowie das Spalten der Laserfacetten wurden optimiert. Abb. 1 zeigt die Kennlinien eines RW-Diodenlasers mit einer Emission

Laser heterostructures are deposited by metalorganic vapor phase epitaxy on two inch GaN (0001) substrates. The gain region is comprised of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ -multiquantum wells, followed by an  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  electron blocking layer to reduce leakage currents and a  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  waveguide structure. Numerous single steps of the chip processing were optimized, such as the fabrication of low-resistance electric contacts to p-type GaN, the structuring of ridge waveguides (RW) with a ridge width of 1.5  $\mu\text{m}$  as well as the cleaving of laser resonator facets. Fig. 1 shows the characteristic of a RW diode laser emitting at 414 nm under cw operation

bei 414 nm, der "p-side up" auf eine passive Wärmesenke montiert und cw betrieben wurde. Die Flussspannung von ca. 6,5 V und die differentielle Effizienz von 1,1 W/A kommen den Werten kommerzieller Dioden nahe. Zwar ist durch Eigenerwärmung die maximale optische Ausgangsleistung noch auf < 60 mW begrenzt, jedoch verdeutlicht Abb. 2 das große Potenzial dieser Heterostrukturen für die Realisierung von Hochleistungs-diodenlasern. Breitstreifendiodenlaser liefern im Kurzpulsbetrieb Ausgangsleistungen von bis zu 700 mW.

Bislang am FBH hergestellte RW-Diodenlaser decken einen Wellenlängenbereich von 404 bis 422 nm ab. Die Realisierung längerer Wellenlängen erfordert höhere Indiumgehalte in den Quantenfilmen und damit veränderte Epitaxiebedingungen. Des Weiteren zeigen theoretische Berechnungen, dass das Design des Wellenleiters und das des Multiquantenfilms angepasst werden müssen, um eine niedrige Schwellstromdichte zu gewährleisten. Ausgehend von einer Laserstruktur für 405 nm wurden die Dicke und die Zusammensetzung des Wellenleiters sowie die Anzahl, die Dicke und der Abstand der  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Quantenfilme optimiert. Im Ergebnis konnte die Schwelle für optisch gepumptes Lasing bei einer Wellenlänge von 465 nm von ca. 2  $\text{MW}/\text{cm}^2$  auf 300  $\text{kW}/\text{cm}^2$  gesenkt werden. Dieser Wert kommt typischen Schwellleistungsdichten von Laserstrukturen mit einer Emission bei 405 nm nahe. Abb. 3 zeigt die Emissionsspektren verschiedener optisch gepumpter Laserstrukturen im Wellenlängenbereich von 395 bis 465 nm.

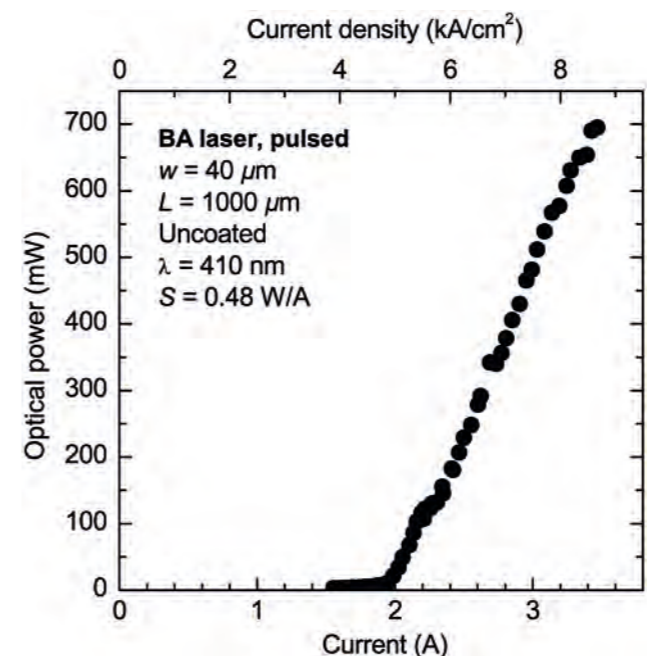


Abb. 2: Leistung-Strom-Kennlinie einer BA-Laserdiode im Kurzpulsbetrieb.  
Fig. 2: Optical power-current characteristics of a BA diode laser under short-pulse operation.

which was mounted p-side up on a passively cooled heat sink. The operation voltage of approximately 6.5 V and the differential efficiency of 1.1 W/A are close to typical values of commercial diodes. Albeit self-heating limits the maximum output power to < 60 mW, Fig. 2 reveals the great potential of this heterostructure for the realization of high-power diode lasers. BA diode lasers show output powers of up to 700 mW under short-pulse operation.

So far, RW diode lasers fabricated at FBH cover a wavelength range of 404 to 422 nm. The realization of longer wavelength requires higher indium mole fractions in the quantum films and therefore modified conditions for epitaxy. Moreover, theory predicts that the design of the waveguide and the multi-quantum wells needs to be optimized to ensure a low threshold current density. Starting from a laser structure for 405 nm, the thickness and the composition of the waveguide as well as number, thickness and pitch of the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  quantum films were optimized. As a result, the threshold for optically pumped lasing at a wavelength of 465 nm was lowered from approximately 2  $\text{MW}/\text{cm}^2$  to 300  $\text{kW}/\text{cm}^2$ . The latter value is close to typical threshold power densities for laser structures emitting at 405 nm. Fig. 3 shows the emission spectra of various optically pumped laser structures in the wavelength range 395 to 465 nm.

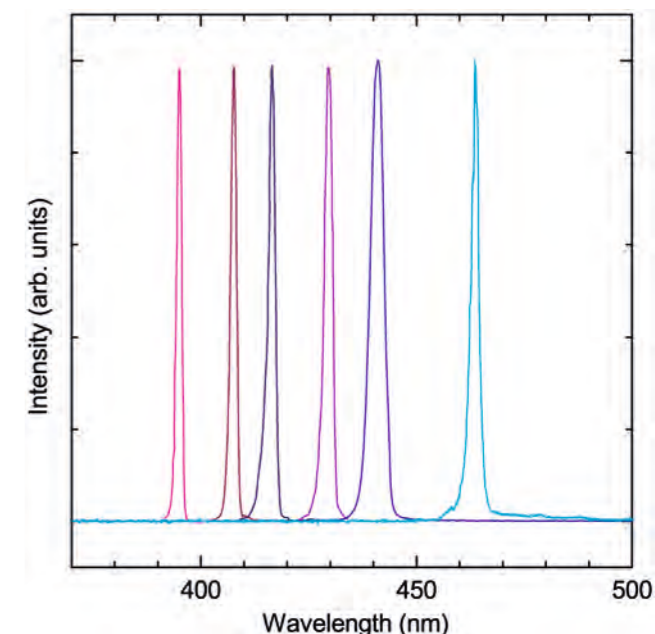


Abb. 3: Emissionsspektren optisch gepumpter Laserstrukturen.  
Fig. 3: Emission spectra of optically pumped laser structures.



## Veröffentlichungen // Publications

J. R. van Look, S. Einfeldt, O. Krüger, V. Hoffmann, A. Knauer, M. Weyers, P. Vogt and M. Kneissl, „Laser Scribing for Facet Fabrication of InGaN MQW Diode Lasers on Sapphire Substrates“, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, Issue 6, p. 416 - 418 (2010).

U. Zeimer, U. Jahn, V. Hoffmann, M. Weyers, M. Kneissl, „Optical and structural properties of InGaN/(AlIn)GaN multiple quantum wells grown at different temperatures and In supply“, accepted for publication in Journal of Electronic Materials (2010)

## LASERDIODEN AUF NICHT-POLAREM UND SEMIPOLAREM GAN

Das (InGaAl)N-Materialsystem ermöglicht die Herstellung von Lichtemittern mit Wellenlängen, die das gesamte sichtbare Spektrum zwischen ultraviolett und infrarot abdecken. Üblicherweise werden diese Bauelemente auf der polaren (0001)-Kristallebene gewachsen, die als c-Ebene bezeichnet wird. Dabei entstehen starke Polarisationsfelder in den Quantengraben, die die Leistungsfähigkeit der Bauelemente deutlich reduzieren. Polarisationsfelder lassen sich signifikant verringern oder gar völlig eliminieren wenn nicht- oder semipolare Kristallebenen für das Wachstum verwendet werden. Ein damit einhergehender Vorteil ist der erhöhte Indiumeinbau während des epitaktischen Wachstums.

Bei der Herstellung von Laserdioden auf nicht- und semipolaren Kristallebenen muss die kristallographische Ausrichtung des Laserresonators beachtet werden, um den höchstmöglichen Gewinn und damit die kleinste Laserschwelle zu erzielen (siehe Abb. 1). An der TU Berlin wurden Experimente zur optischen Anregung von Laserstrukturen auf unterschiedlichen nicht- und semipolaren GaN-Substraten durchgeführt, die am FBH mittels Metallorganischer Gasphasenepitaxie hergestellt wurden. Abb. 2 zeigt, dass die Schwelle für verstärkte spontane Emission bei einer Wellenlänge von etwa 400 nm dann am niedrigsten ist, wenn die Anregung entlang der Projektion der c-Achse (genannt c') auf die semipolare Wachstumsebene geschieht. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass auch die Polarisation des emittierten Lichts durch die Ausrichtung des Laserresonators auf der semipolaren GaN-Oberfläche beeinflusst wird.

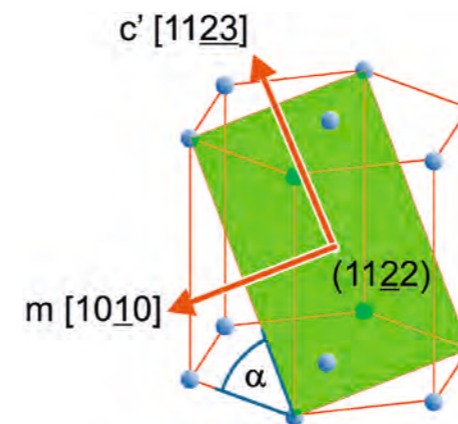


Abb. 1: Ausrichtung des Laserresonators entlang der nichtpolaren [1010] m- oder der semipolaren [1123] c'-Richtung auf semipolarem (1122) GaN.  
Fig. 1: Nonpolar resonator orientation along m [1010] and semipolar resonator orientation along c' [1123] for semipolar (1122) GaN.

## LASER DIODES ON NONPOLAR AND SEMIPOLAR GAN

Laser diodes based on the (InGaAl)N material system offer the possibility to fabricate light emitters with wavelengths ranging from the infrared to the ultraviolet, thus covering the whole visible spectrum. These devices are usually grown on the polar (0001) crystal plane, the so-called c-plane. However, heterostructures grown along c-direction experience strong polarization fields across the quantum wells leading to a deterioration of the device performance. In order to avoid this, non- or semipolar crystal planes are used so that polarization fields can be significantly reduced or completely eliminated. An additional advantage of semipolar devices is the enhanced indium incorporation during the epitaxial growth.

When laser diodes are fabricated on nonpolar or semipolar planes, the orientation of the laser resonator has to be taken into account in order to achieve maximum gain and lowest threshold (see Fig. 1). Photo-pumping experiments have been performed at TU Berlin on laser structures grown on different semipolar and nonpolar bulk GaN substrates by metalorganic vapor phase epitaxy at the FBH. Fig. 2 shows that the threshold for amplified spontaneous emission for wavelengths around 400 nm is lowest along the projection of the c-axis onto the plane of growth, i.e. the semipolar c' direction for semipolar devices. Furthermore, it was confirmed that the optical polarization of the emitted light is influenced by the resonator orientation on semipolar (1122) GaN.

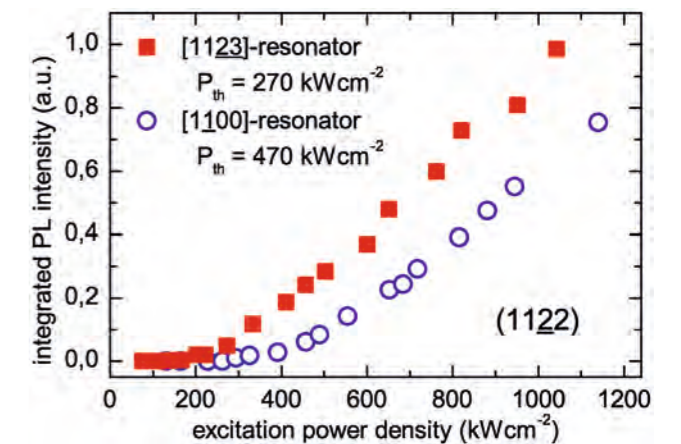


Abb. 2: Anregungsabhängigkeit der integrierten PL-Intensität bei Laserstrukturen auf semipolarem (1122)-GaN mit semipolarem c' [1123]- und nichtpolarem [1010] m-Resonator.  
Fig. 2: Integrated PL-intensity as a function of excitation power density for laser structures on semipolar (1122) GaN substrates with semipolar c' [1123] and nonpolar m [1010] resonators.

Diese Ergebnisse haben Konsequenzen für die Prozessierung der Laserdioden, insbesondere für die Herstellung der Facetten von Laserresonatoren. Bei Lasern auf polaren und nichtpolaren Ebenen wurden die Facetten durch laserunterstütztes Spalten erzeugt und wiesen im Falle nichtpolarer Facetten eine sehr geringe mittlere Rauigkeit von weniger als einem Nanometer auf (Abb. 3). Für die semipolaren Laser existieren dagegen keine geeigneten Spaltfacetten, so dass diese durch anisotropes Trockenätzen erzeugt werden müssen. An polaren Lasern wurde gezeigt, dass durch einen dreistufigen Plasmaätzprozess senkrechte Facetten erzeugt werden können, deren Reflektivität vergleichbar mit gespaltenen Facetten ist (Abb. 4). Für semipolare Facetten wurde der Prozess optimiert und richtungsabhängige Ausläufer im Ätzprofil konnten erfolgreich unterdrückt werden.

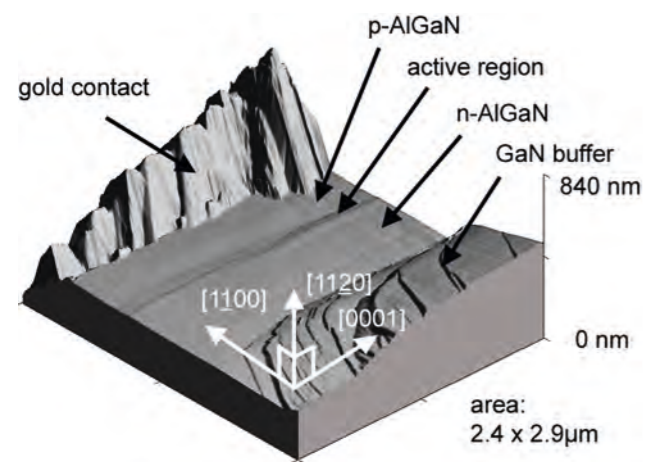


Abb. 3: Raster-Kraft-Mikroskopiebild einer mittels laserunterstütztem Spalten erstellten a-Facette eines nichtpolaren Lasers.  
Fig. 3: Atomic force microscopy image of the a-facet of an m-plane laser structure formed by laser scribing and subsequent cleaving.

These results lead to significant consequences for device processing, particularly for the formation of laser facets. Facets were created by laser scribing and cleaving for devices grown on polar and nonpolar planes. In the case of nonpolar facets, the cleaving process led to very smooth facets with an rms roughness of less than 1 nm on the facet, as shown in Fig. 3. Since there is no semipolar cleavage plane, semipolar facets have to be formed by anisotropic plasma etching. As a proof of concept a three step etching process was established for polar GaN which allows the formation of vertical facets that show the same reflectivity as cleaved facets, as illustrated in Fig. 4. Regarding semipolar facets, the plasma etching process has been optimized and an orientation-dependent tailing could be successfully suppressed.

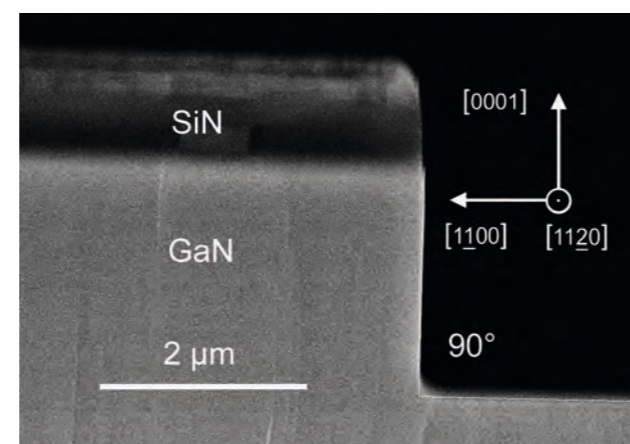


Abb. 4: Durch Plasmaätzen erzeugte senkrechte Laserfacette eines polaren c-plane Lasers.  
Fig. 4: Vertical laser facet of a polar c-plane laser produced by plasma etching.

Zusammenfassend wurde die Resonatorrichtung mit maximaler Verstärkung für (InGaAl)N-Laser auf nicht- und semipolaren Substraten identifiziert und ein Prozess zur Herstellung entsprechender Laserfacetten entwickelt. Diese Ergebnisse bieten gemeinsam mit den oben genannten Vorteilen nicht- und semipolarer Kristallrichtungen die Möglichkeit, die Effizienz von GaN-basierten Laserdioden deutlich zu erhöhen.

In summary, the direction of highest gain in (InGaAl)N laser structures on nonpolar and semipolar crystal planes was identified, and the processes for the formation of corresponding laser resonators have been developed. In conjunction with the advantages of semipolar and nonpolar crystal orientations described above, these results might lead to a significant improvement of the overall device performance.

## Veröffentlichungen // Publications

J. Rass, T. Wernicke, W.G. Scheibenzuber, U.T. Schwarz, J. Kupec, B. Witzigmann, P. Vogt, S. Einfeldt, M. Weyers, and M. Kneissl, „Polarization of eigenmodes in laser diode waveguides on semipolar and nonpolar GaN“, Physica Status Solidi RRL 4, No. 1, 1-3 (2010).

# GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

## MATERIALIEN UND PROZESSE

Das FBH hat seine technologischen Arbeiten in den vergangenen Jahren vom etablierten Galliumarsenid (GaAs) zunehmend zu Gruppe-III-Nitriden verlagert. Es wird jedoch weiter intensiv daran gearbeitet, die Effizienz und die spektralen Eigenschaften von GaAs-Laserdioden zu erhöhen. Bei den Galliumnitrid (GaN)-Bauelementen konzentrieren sich die Aktivitäten auf Leistungsbauelemente für Mikrowellen- und Leistungs-Schaltanwendungen, UV-LEDs und Laserdioden. Die umfassenden Aktivitäten der Abteilungen Material- und Prozesstechnologie liefern die technologischen Voraussetzungen für gezielte Entwicklungen von Bauelementen, die später in den jeweiligen Geschäftsbereichen realisiert werden.

Beispiele sind Schichtentwicklungen für GaN-basierte Hochvolt-Leistungstransistoren sowie die Epitaxie von Ga(In)N-Schichtstrukturen mit nichtpolarer Orientierung, die effizientere blaue und grüne Laserdioden ermöglichen. Ebenso wird an defektarmen AlN-Schichten als Basis für ultraviolette Leuchtdioden geforscht. Von zentraler Bedeutung, insbesondere für GaN-basierte Laserdioden, sind Substrate mit geringer Defektdichte, die am FBH mittels HVPE hergestellt werden. Neu sind Arbeiten zu (Al)GaN-basierten Photodetektoren mit dem Ziel der Bauelemententwicklung sowie dem Einsatz als Werkzeug zur Materialcharakterisierung.

Die Installation eines MOVPE-Reaktors für AlGaIn auf acht 4"-Substraten Ende 2009 erlaubt künftig eine noch effizientere Entwicklung von Epitaxieprozessen, da jetzt für elektronische und optoelektronische Bauelemente jeweils ein Mehrscheibenreaktor verfügbar ist. Dazu waren Umbaumaßnahmen im Labor notwendig, die allerdings auch zu zwei Monaten Stillstand bei der Epitaxie von AlGaIn-LEDs geführt haben. In dieser Zeit wurden im Reinraum weitere Geräte, darunter eine neue Elektronenstrahl-Belichtungsanlage, installiert und umfangreiche Maßnahmen durchgeführt, mit denen beste Voraussetzungen für die weitere Entwicklung von State-of-the-Art-Bauelementen am FBH geschaffen wurden.

Im Bereich der Bauelementprozessierung lag der Schwerpunkt auf Trockenätzverfahren für GaN-basierte LEDs und Laser sowie für Hochleistungstransistoren mit "Embedded oder Recessed Gates". Bei UV-LEDs und Lasern auf GaN-Basis steht die Entwicklung geeigneter Ohm'scher Kontakte zu p-GaN und n-AlGaIn im Vordergrund. Außerdem wurden Ätzverfahren zur Herstellung von Gitterstrukturen für GaAs-basierte Laser weiterentwickelt. Im Rahmen einer F&E-Kooperation wurden am FBH erstmalig UV-Photodetektoren auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) prozessiert. Die notwendigen Technologien zur Strukturierung und Kontaktherstellung wurden entwickelt. Darüber hinaus laufen hier auch externe Dienstleistungen wie die Lieferung von Epitaxiewafern, Analytik von Schicht- und Bauelementstrukturen sowie Waferprozesse für Kunden aus Forschung und Industrie.

## MATERIALS AND PROCESSES

The FBH has continued to shift its focus from well established GaAs technologies to group-III nitrides. However, increasing efficiency and spectral properties of GaAs laser diodes are aims which are still intensely pursued. In the field of gallium nitride (GaN) devices, work is focused on power transistors for microwave and power switching applications as well as laser diodes and UV LEDs. The Materials Technology and Process Technology Departments provide the technological preconditions for the development of devices that are realized in the respective Business Areas.

Examples are the development of epitaxial layers for GaN power transistors for high operating voltages as well as growth of Ga(In)N heterostructures with nonpolar orientation paving the way for more efficient blue and green laser diodes. Also AlN layers with reduced defect density for UV LEDs are being developed. Especially for GaN-based laser diodes, substrates with low defect density are of pivotal importance. At FBH, such substrates are developed using hydride vapor phase epitaxy (HVPE). (Al)GaN photo detectors, both as device and tool for the characterization of epitaxial layers, are a new research topic.

The installation of a MOVPE reactor for AlGaIn growth on up to eight 4" wafers at the end of 2009, prospectively allows for more efficient development of growth processes as optoelectronic and electronic devices can now be processed on two different multiwafer machines. However, preparing the lab for this installation has led to two months downtime in the development of AlGaIn LEDs. During this period additional equipment for frontend processes has been installed in the cleanroom, including a new highly flexible e-beam lithography tool for both direct write and mask making applications. Together with an upgrade of the cleanroom itself, the total of these measures sustainably improves FBH's basis for the development of state-of-the-art devices.

In device processing, new developments have been made in dry etching of GaN-based LEDs and laser diodes and in the fabrication of GaN power transistors with "embedded and recessed gates". For UV-LEDs and GaN laser diodes Ohmic contacts to p-GaN and n-AlGaIn were in the focus. For GaAs laser diodes the fabrication of gratings for wavelength stabilization was further optimized. Within a research cooperation, the FBH has successfully demonstrated UV photo detectors based on SiC for which the necessary technologies for etching and contact formation have been developed. Besides basic developments in epitaxy and process technology, external services like delivery of epitaxial wafers, customer-related wafer processes and analysis of device structures are an integral part of the work in the materials and processes field.

## EINKRISTALLINE SUPERSPIEGEL – AUF DEM WEG ZUR ULTIMATIVEN OPTISCHEN UHR UND NEUEN TESTS DER QUANTENPHYSIK

Die Eigenschaften, die Superspiegel bieten, sind schier unglaublich: Sie sind vergleichbar mit einer Ebene von 100 km Radius, deren höchste Erhebung nur einen Millimeter hoch ist, oder einer Glocke, die – einmal angeschlagen – einen Tag oder sogar ein Jahr klingt. Ebenso erstaunlich sind Oberflächen, die Licht derart gut reflektieren, dass es zwischen zwei Flächen eine Million Mal hin und her laufen kann, bevor die Lichtintensität merklich absinkt. Dies alles sind die Anforderungen, die auf miniaturisierte Abmessungen übertragen, an Superspiegel gestellt werden. Diese spielen eine zentrale Rolle bei Anwendungen wie optischen Zeitstandards der nächsten Generation – damit kann das Alter unseres Universums auf eine Zehntelsekunde genau ermittelt werden –, Experimenten zur Quantenphysik in makroskopischen optomechanischen Systemen sowie bei der Detektion von theoretisch vorhergesagten Gravitationswellen.

Superspiegel, die aus dielektrischen Materialien wie  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  kombiniert werden, können mit sehr hoher Reflektivität und sehr geringer Rauigkeit hergestellt werden. Die internen mechanischen Vibrationen (Phononen) dieser amorphen Materialien begrenzen aber den mechanischen Gütefaktor Q (entspricht der Anzahl von Umläufen bis das System abgeklungen ist) auf etwa  $10^4$ . Sehr präzise Messungen erfordern einen höheren Q-Faktor und damit mehr Umläufe.

Ein sehr vielversprechender Ansatz zur Verringerung der mechanischen Verluste ist, statt amorpher möglichst perfekte einkristalline Spiegel zu benutzen. Dafür bietet sich das ternäre System AlGaAs an, das über den gesamten Zusammensetzungsbereich ungefähr die gleiche Gitterkonstante hat und damit Spiegel mit sehr hoher kristalliner Perfektion erlaubt.

Abb. 1: Reflektivität bei Raumtemperatur eines Stapels von 40 Paaren von  $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{As}/\text{Al}_{0,92}\text{Ga}_{0,08}\text{As}$ . Das Zentrum des Stopbands (Bereich hoher Reflektivität) verschiebt sich zur Zielwellenlänge 1064 nm bei 20 K.

Fig. 1: Reflectivity at room temperature of 40 pairs of  $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{As}/\text{Al}_{0,92}\text{Ga}_{0,08}\text{As}$ . The center of the stop band (region of high reflectivity) moves to the target wavelength of 1064 nm at 20 K.

## SINGLE CRYSTAL SUPER MIRRORS – TOWARDS THE ULTIMATE OPTICAL CLOCK AND TESTING THE FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS

Super mirrors feature almost unbelievable properties: Imagine a landscape so flat that within a 100 km radius elevations do not exceed one millimeter or a bell that, once struck, rings for more than a day – or even a year. Likewise amazing are surfaces which reflect light so well that it can bounce back-and-forth between two of them a million times before getting substantially attenuated. These are, properly scaled and translated, properties that one asks of "super mirrors" which today are instrumental in applications ranging from building next-generation optical clocks, so precise that they could measure the age of the universe to a tenth of a second, to testing the foundations of quantum physics in macroscopic optomechanical systems, as well as the long anticipated detection of gravitational waves.

Super mirrors made of dielectrics ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) show very low roughness and high reflectivity. However, the internal vibrations of these amorphous materials limit the mechanical Q-factor (i.e., roughly the number of oscillations before the system rings down) to around  $10^4$ . A higher Q-factor and thus more oscillations are desired for higher precision.

One very promising approach to reduce the mechanical losses is to entirely avoid amorphous materials and to fabricate mirrors that are essentially perfect crystals. The AlGaAs ternary alloy system has nearly the same lattice constant for all compositions and allows for high-reflectivity mirrors with very high crystalline perfection.

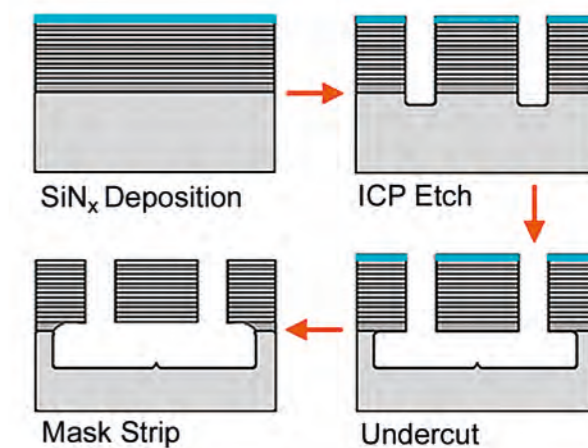
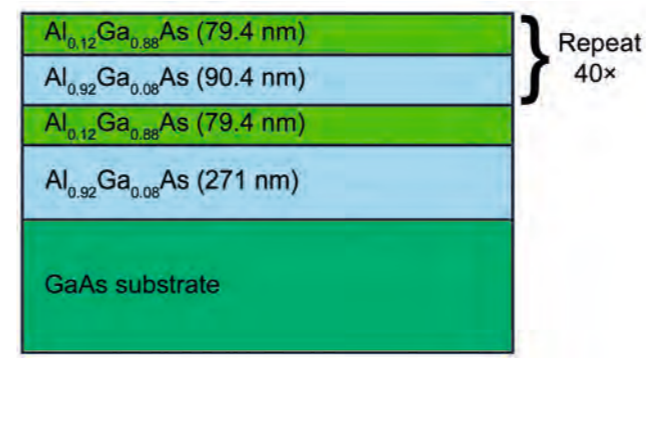
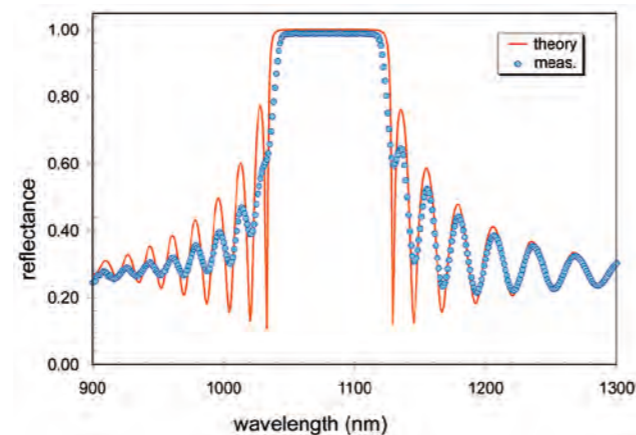


Abb. 2: Schichtenfolge (links) und Prozessablauf zur Herstellung von Spiegeln für mikromechanische Resonatoren (rechts).  
Fig. 2: Layer stack (left) and process sequence (right) for mirrors for micromechanical resonators.

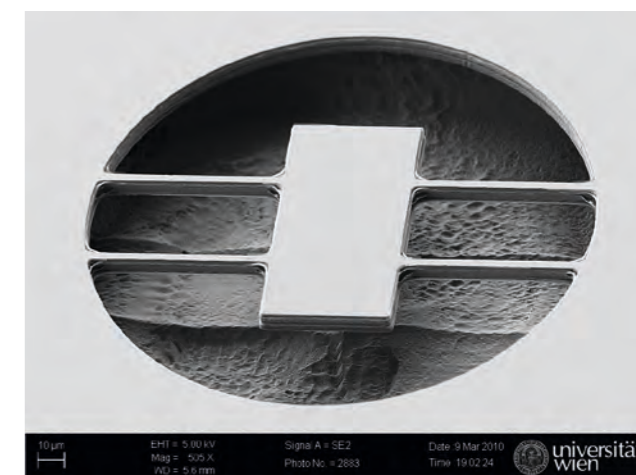
Das FBH hat umfangreiche Erfahrung mit dem Wachstum solcher Spiegel für oberflächenemittierende Laser (VCSEL und VECSEL) und Halbleiterspiegel mit sättigbarer Absorption (SESAM) für die Erzeugung kurzer Laserpulse. Diese Kompetenz wurde für die Herstellung von AlGaAs-Vielschichtspiegeln genutzt, die auf Pufferschichten hergestellt wurden, die selektiv unter dem Spiegel weggeätzt werden können. Die Zielwellenlänge von 1064 nm bei Temperaturen um 20 K bedeutet, dass die höchste Reflektivität von 99,999% bei Raumtemperatur bei 1075 nm erreicht werden muss (Abb. 1).

Kooperationspartner an der Universität Wien haben aus dieser ersten Generation von Spiegelschichten mikromechanische Resonatoren prozessiert, indem die Schichten unter dem Spiegel durch Unterätzen entfernt wurden (Abb. 2 und 3). Mit diesen Spiegeln wurden Q-Faktoren von  $0,8 \times 10^5$  erreicht. Weitere Verbesserungen sind durch mehr Spiegelschichten und eine Optimierung der Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten zu erwarten. Das FBH kann damit seine technologische Erfahrung in grundlagenorientierte Experimente zur Erforschung quantenphysikalischer Phänomene einbringen.

Abb. 3: Mikromechanischer Resonator hergestellt durch Unterätzen eines Mehrschicht-Spiegels.  
Fig. 3: Micromechanical resonator processed from mirror stack by selective undercutting.

The FBH has a wealth of experience in the growth of such mirrors for application in surface emitting lasers (VCSEL and VECSEL) and saturable absorbing mirrors (SESAM) generating short laser pulses. This expertise has now been used to produce AlGaAs mirror stacks on sacrificial layers that can be selectively etched. The target wavelength of 1064 nm at temperatures below 20 K implies that the highest reflectivity of above 99.999% has to be around 1075 nm at room temperature (Fig. 1).

The cooperation partners at the University of Vienna processed this first generation of mirror stacks into micromechanical resonators by etching away the sacrificial layers (Figs. 2 and 3). With these mirrors Q-factors of  $0.8 \times 10^5$  have been achieved. Further improvement can be expected from increasing the number of layer pairs and optimizing the interfaces between the constituent layers. Leveraging its technological experience, the FBH can thus contribute to the progress in fundamental research in quantum physics.



## VERSETZUNGSREDUZIERTER GAN- UND ALGAN-SCHICHTEN DURCH HVPE

Für violette und blaue Laserdioden, die in der Datenspeicherung (Blu-ray Disc) und der Display-Technik (Laser-TV) zum Einsatz kommen, werden Substrate aus Galliumnitrid (GaN) benötigt. Diese können jedoch nicht mit den gängigen Verfahren der Volumenkristallzüchtung hergestellt werden. Das Verfahren der Wahl ist die Hydrid-Gasphasenepitaxie (HVPE), die hohe Wachstumsraten ermöglicht. Sie basiert auf der Reaktion von Gallium (Ga) bzw. Aluminium (Al) mit Chlorwasserstoff (HCl), wodurch sich mit Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) GaN bzw. AlGaN bildet.

Laserdioden und Leuchtdioden reagieren empfindlich auf Versetzungen. Das sind Kristalldefekte, die sowohl die strahlende Rekombination und damit die Lichtausbeute verringern als auch die Alterung der Bauelemente beschleunigen. Versetzungen bilden sich insbesondere wenn die Bauelementstruktur auf einem Fremdsubstrat mit einer nicht genau passenden Gitterkonstanten abgeschieden wird. Am FBH wurde auf einem für die Herstellung von GaN-Kristallen entwickelten Reaktor (AIXTRON V-HVPE) das rissfreie Wachstum von GaN bis zu einer Dicke von 2,6 mm bei einer Wachstumsrate von 400  $\mu\text{m}/\text{h}$  demonstriert (Abb. 1). Mit zunehmender Dicke wird eine Versetzungsdichte von unterhalb  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  erreicht (Abb. 2), wie sie von den Herstellern von Laserdioden gefordert wird. Eine weitere Erhöhung der Kristalllänge erfordert die Verbesserung der Oberflächenmorphologie bei gleichzeitiger Vermeidung von Rissbildungen. Ein wichtiges Zwischenziel sind dabei ca. 6 mm Kristalllänge, wie sie von Herstellern von GaN-Substraten gezeigt wurden. Dabei werden jedoch deutlich niedrigere und damit wirtschaftlich unvorteilhafte Wachstumsraten von nur 100  $\mu\text{m}/\text{h}$  verwendet.



Abb. 1: 2,6 mm dicker GaN-Boule.  
Fig. 1: GaN boule of 2.6 mm thickness.

## REDUCED DISLOCATION DENSITY OF GAN AND ALGAN LAYERS BY HVPE

For violet and blue laser diodes, which are used for data storage (Blu ray disc) and display technology (laser TV), gallium nitride (GaN) substrates are required. As they can not be produced by usual crystal growing techniques, hydride vapor phase epitaxy (HVPE) with its high growth rates, is the method of choice. In this process the formation of GaN and AlGaN is based on the chemical reaction of gallium (Ga) or aluminum (Al) with hydrogen chloride (HCl) and ammonia ( $\text{NH}_3$ ) thereafter.

The properties of laser diodes and light emitting diodes are sensitive to dislocations. On the one hand, these crystal defects lower the radiative recombination and therefore the device efficiency, on the other, they accelerate device degradation. Dislocations are particularly formed to compensate mismatched lattice constants in case of growth of a device structure on a foreign substrate. At FBH, the crack-free growth of GaN up to a thickness of 2.6 mm at a growth rate of 400  $\mu\text{m}/\text{h}$  (Fig. 1) was demonstrated in a reactor designed for the production of GaN crystals (AIXTRON V-HVPE). With increasing layer thickness, a dislocation density of less than  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  (Fig. 2) has been achieved – which diode laser manufacturers consider as an essential requirement. However, a further increase in crystal thickness requires improvement of the surface morphology and, simultaneously, avoidance of cracking. A crystal thickness of about 6 mm has been shown by some manufacturers of GaN substrates. However, these results have been achieved with considerably lower and therefore uneconomical growth rates of only 100  $\mu\text{m}/\text{h}$ .

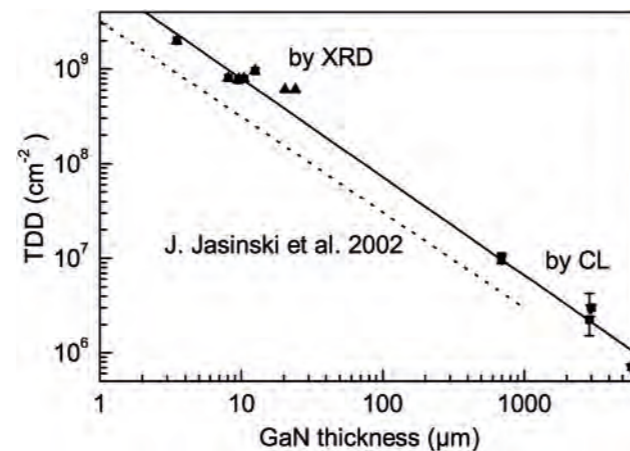


Abb. 2: Abnahme der Versetzungsdichte mit der Dicke in GaN.  
Fig. 2: Decrease of the dislocation density with increasing thickness in GaN.

Die in Abb. 2 dargestellte Reduktion der Versetzungsdichte mit der Dicke kann auch für die Verbesserung von UV-Leuchtdioden eingesetzt werden. Daher wird in einem horizontalen HVPE-Reaktor das Wachstum von AlGaN-Schichten untersucht. Voraussetzung dafür war die Modifikation des Reaktors, um eine homogene Durchmischung von GaCl und  $\text{AlCl}_3$  und damit eine homogene Schichtzusammensetzung, d.h. eine Variation von 5% im Al-Gehalt über einen 2-Zoll-Wafer, zu erreichen. Auch hier führt die Gitterfehlpassung zum Saphir-Substrat wieder zu Rissbildungen und Kristalldefekten, die sich in Verbreiterungen der Röntgen-Rockingkurven (FWHM) widerspiegeln. Durch den Einsatz von mit Grabenstrukturen versehenen Substraten und strukturierten AlN/Saphir-Startschichten konnte die Rissbildung unterdrückt und die Morphologie verbessert werden (Abb. 3).

The decrease in dislocation density with increasing layer thickness shown in Fig. 2 could also be used to improve UV light emitting diodes. Hence, the growth of AlGaN layers in a horizontal HVPE reactor is investigated. To achieve a homogeneous mixture of GaCl and  $\text{AlCl}_3$  and therefore a homogeneous layer composition, i.e. a variation in the Al fraction of less than 5% across a 2-inch wafer, the reactor had to be modified. Also for AlGaN, the lattice mismatch towards the sapphire substrate leads to cracking and crystal defects, which are reflected in the broadening of x-ray rocking curves (FWHM). The application of trench patterned substrates and structured AlN/sapphire templates offers the possibility to suppress cracking and therefore to improve the surface morphology (Fig. 3).

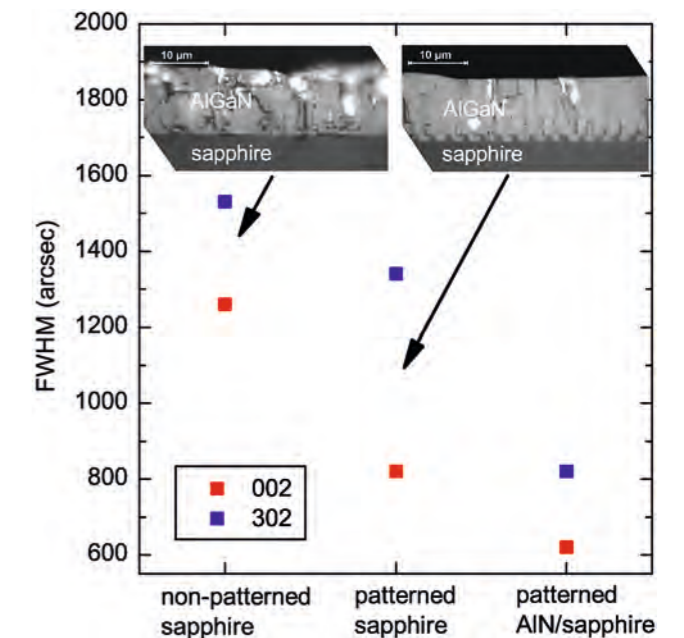


Abb. 3: Halbwertsbreite von Röntgenbeugungs-Rockingkurven und Querschnitte von 10  $\mu\text{m}$  dicken  $\text{Al}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$ -Schichten auf verschiedenen Substraten: planarer Saphir, strukturierter Saphir und strukturiertes AlN/Saphir-Template.

Fig. 3: Full width of half maximum of x-ray rocking curves and cross sections of 10  $\mu\text{m}$  thick  $\text{Al}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$  layers on different substrates: planar sapphire, structured sapphire and structured AlN/sapphire template.

## Veröffentlichungen // Publications

E. Richter, U. Zeimer, F. Brunner, S. Hagedorn, M. Weyers, G. Tränkle, „Boule-like growth of GaN by HVPE“, Phys. Stat. Sol. C 7, 28-31 (2010).

S. Hagedorn, E. Richter, C. Netzel, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, „HVPE growth of AlGaN alloy layers“, Phys. Stat. Sol. C 6, S309-S312 (2009).

## PENDEO-EPITAXIE VON (AL,Ga)N FÜR UV-EMITTER

Ultraviolettes (UV) Licht ist vielfältig einsetzbar. So wird UV-B-Licht (280 - 320 nm) für die Behandlung von Schuppenflechten genutzt, und UV-C-Licht (um 265 nm) kann Viren und Bakterien effektiv abtöten, indem es die genetische Information der Organismen zerstört. Diese Eigenschaft macht man sich beispielsweise bei der Wasserdesinfektion zunutze. Heutige Desinfektionsanlagen verwenden dazu das UV-Licht von Quecksilberdampflampen. Ersetzt man diese durch UV-Leuchtdioden (UV-LEDs) werden die Systeme kompakter, langlebiger und umweltfreundlicher. Da für eine breite Anwendung die Ausgangsleistungen der UV-LEDs noch zu gering sind, arbeitet das Ferdinand-Braun-Institut an einer Erhöhung der Effizienz und damit der Leistung.

UV-LEDs basieren auf dem Materialsystem (Al,Ga)N, über dessen Zusammensetzung eine Emissionswellenlänge zwischen 210 und 365 nm eingestellt werden kann. Die Epitaxie von (Al,Ga)N auf einem Saphirsubstrat führt aufgrund der großen Gitterfehlpassung zu typischen Versetzungsdichten von einigen  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Eine solch hohe Versetzungsdichte reduziert die Effizienz der UV-LEDs drastisch, da an Versetzungen Ladungsträger nichtstrahlend rekombinieren können. Die Verringerung der Versetzungsdichte ist für die Realisierung effizienter LEDs unabdingbare Voraussetzung. Für GaN kann dies durch das epitaktische laterale Überwachsen (ELOG) von maskierten Schichten erreicht werden. Dieses Verfahren funktioniert für AlGaIn nicht, da die Al-Atome am Maskenmaterial haften und dort Wachstum stattfindet. Am FBH wird deshalb eine spezielle Variante des ELOG, die maskenlose Pendoe-Epitaxie, eingesetzt.

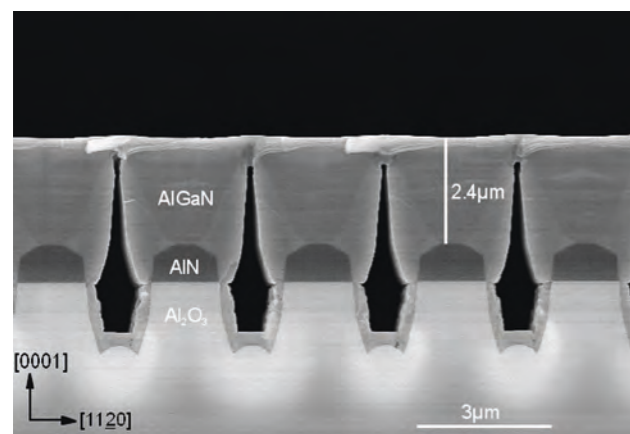


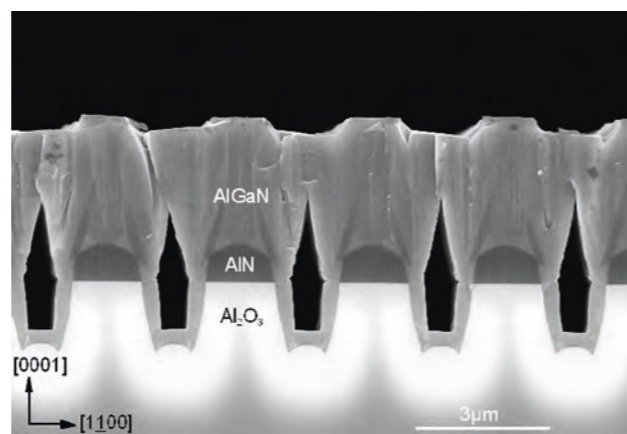
Abb. 1: Elektronenmikroskopie der Spaltkante einer AlN/Saphir-Streifenstruktur überwachsen mit AlGaIn, a) Streifenstruktur in [1100]; b) in [1120]-Richtung. Die Kontraste innerhalb der AlGaIn-Schicht stammen von unterschiedlichen Zusammensetzungen auf den verschiedenen wachsenden Facetten.

Fig. 1: Cross-sectional electron microscopy of an AlN/sapphire stripe pattern overgrown with AlGaIn, a) stripe pattern in [1100]; b) in [1120] direction. An Al composition variation on distinct growing facets leads to contrast differences within the AlGaIn layer.

## PENDEO EPITAXY OF (AL,Ga)N FOR UV EMITTING DEVICES

Ultraviolet (UV) light can be used in a wide range of applications. UV-B light (280 - 320 nm) for example may be utilized for psoriasis treatment, and UV-C light (around 265 nm) effectively kills viruses and bacteria by destroying the genetic information of organisms. This effect is taken advantage of in water purification systems to produce potable water. Today's purification systems employ mercury lamps as UV-light sources. Replacing them by UV light emitting diodes (LEDs) would lead to more compact, longer living and environmentally friendly purification systems. Since the output power of UV LEDs is currently insufficient for such application, the Ferdinand-Braun-Institut aims at increasing the efficiency and therefore the output power of these devices.

UV LEDs are based on the material system (Al,Ga)N. By tuning the composition of this material, emission wavelengths between 210 and 365 nm can be achieved. Due to the large lattice mismatch between (Al,Ga)N and the sapphire substrate, the epitaxy of (Al,Ga)N leads to high threading dislocation densities (TDD) in the range of  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . However, high TDDs significantly reduce the efficiency of UV LEDs due to non-radiative recombination of carriers at dislocations. Hence, TDD reduction is a basic requirement for the realization of efficient UV LEDs. For GaN, a TDD reduction can be achieved by applying epitaxial lateral overgrowth (ELOG) of masked templates. This method is not feasible for (Al,Ga)N, as Al atoms stick to the mask material and growth takes place. Therefore, maskless pendoe epitaxy, a special approach of ELOG, is used at the FBH.



b)

Eine etwa 800 nm dicke AlN-Schicht wird mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie auf c-plane Saphir abgeschieden und danach über eine anisotrope Plasmaätzung in Streifen mit einer Breite von 1,5  $\mu\text{m}$  und einer Periode von 3  $\mu\text{m}$  strukturiert. Diese strukturierte Schicht wird anschließend mit (Al,Ga)N überwachsen. Die Streifenorientierung hat einen großen Einfluss auf das laterale Wachstum von AlGaIn und die Al-Konzentration ist stark abhängig von den Wachstumsfacetten. Abb. 1a zeigt die Spaltkante einer (Al,Ga)N-Schicht, die auf AlN/Saphir-Streifen in [1100]-Richtung abgeschieden wurde. Die Al-Konzentration (sichtbar als Kontrast in Form eines Scheinwerfers) variiert zwischen ~30% in den Seitenflanken (hell) und ~50% in der Oberfläche (dunkler). Die Koaleszenz, d.h. das Schließen der Schicht, geschieht nach 1,8  $\mu\text{m}$  vertikalem Wachstum. In Abb. 1b sieht man das überwachsene (Al,Ga)N auf einer Streifenstruktur in [1120]-Richtung. In diesem Fall koalesziert die Schicht schon nach 1,2  $\mu\text{m}$  vertikalem Wachstum, jedoch sind hier wesentlich mehr Facetten am Wachstum beteiligt. Deshalb ist die Verteilung des Al-Gehalts komplexer und die koaleszierte Oberfläche rau und stufig. In Hinblick auf die Morphologie wurden ähnliche Ergebnisse auch für die Pendoe-Epitaxie mit AlN erzielt. Daher werden Streifen in [1100]-Richtung für die Pendoe-Epitaxie bevorzugt. Mit ihnen soll künftig eine weitere Reduktion der Versetzungsdichte in (Al,Ga)N erreicht werden.

An approximately 800 nm thick layer of AlN is deposited on c-plane sapphire by MOVPE. Subsequently, the template is structured into stripes of 1.5  $\mu\text{m}$  width with a pitch of 3  $\mu\text{m}$  by anisotropic plasma etching and then overgrown with (Al,Ga)N. The stripe orientation significantly influences the lateral growth of (Al,Ga)N, and the Al content is strongly dependent on the growing facets. Fig. 1a shows a cross sectional scanning electron microscope micrograph of an (Al,Ga)N layer grown on AlN/sapphire stripes in [1100] direction. A triangle-shaped contrast difference indicates an Al concentration variation between ~30% in the sidewalls (bright) and ~50% at the surface (dark). Coalescence occurs after 1.8  $\mu\text{m}$  vertical growth when the layer reaches a closed surface. Fig. 1b shows overgrown stripes in [1120] direction. In this case, coalescence already occurs after 1.2  $\mu\text{m}$  vertical growth, but many different facets control the growth. Hence, the Al composition distribution is more complex and the coalesced surface becomes rough and ridge-like. Regarding morphology, comparable results were also obtained for AlN pendoe epitaxy. Consequently, stripes in [1100] direction are the more promising pattern for (Al,Ga)N overgrowth to achieve a further reduction of threading dislocations.



Abb. 2: GaN-Multiwafer-Epitaxiereaktor.  
Fig. 2: GaN multi wafer reactor.

## KOHLENSTOFF-DOTIERUNG VON GAN FÜR HOCHSPANNUNGSFESTE ALGAN-GAN-HETEROSTRUKTUR-FELDEFFEKT-TRANSISTOREN

Feldeffekttransistoren auf der Basis von AlGa<sub>x</sub>N-GaN-Heterostrukturen besitzen das Potenzial für effiziente und spannungsfeste Hochfrequenz-Bauelemente. Um die hohen Durchbruchfeldstärken und Driftgeschwindigkeiten in diesem Materialsystem ausnutzen zu können, muss das laterale und vertikale Transistordesign daraufhin optimiert sein. Ein begrenzender Faktor für den Hochspannungsbetrieb ist der so genannte "Punch-through"-Effekt, bei dem Ladungsträger unterhalb des abgeschnürten Kanals durch die Pufferregion driften. Dabei senkt sich mit zunehmender Source-Drain-Spannung die Potenzialbarriere zum Puffer ab, was zu einer "Unterwanderung" der unter dem Gate befindlichen Verarmungszone führt.

Die Potenzialbarriere zum Puffer kann zum einen durch ein Material mit größerer Bandlücke erhöht werden, z.B. durch Einfügen von AlGa<sub>x</sub>N mit geringem Al-Gehalt (Abb. 1). Alternativ können akzeptorartige tiefe Störstellen im Puffer die injizierten Elektronen neutralisieren und damit den Stromfluss minimieren. Häufig wird dazu Eisen eingesetzt, das jedoch über eine zusätzliche Dotierstoffquelle eingebracht werden muss. Dagegen kann Kohlenstoff (C) durch Anpassung der Wachstumsparameter aus den metallorganischen Gruppe-III-Ausgangsstoffen eingebaut werden und führt zudem anders als Eisen zu keinen Memoryeffekten in der Epitaxieanlage.

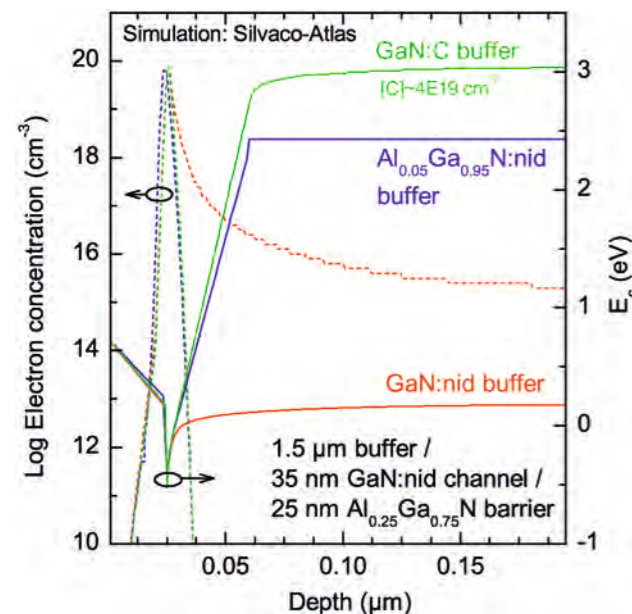


Abb. 1: Simulierte Elektronenkonzentration und Leitungsbandverlauf in einer HFET-Struktur mit unterschiedlichen Puffermaterialien.  
Fig. 1: Physical-based simulation of electron concentration and band structure in HFETs containing different buffer material.

## CARBON DOPING OF GAN FOR HIGH-VOLTAGE ALGAN-GAN HETEROSTRUKTURE FIELD EFFECT TRANSISTORS

GaN-based heterostructure field effect transistors (HFETs) have the potential for very efficient high-voltage operation in a wide range of radio frequency applications. To fully exploit the high breakdown fields and high electron saturation velocity in (Al,Ga)N compounds, lateral and vertical transistor design has to be optimized. One limiting factor for high-voltage operation is the punch-through effect of carriers in the GaN buffer layer, also known as "drain-induced barrier lowering". At a high drain-source bias electrons are injected under the gate depletion region creating a current path in the buffer region.

This effect can be suppressed by using a double hetero-junction structure (DHFET), where the electron channel is confined between the upper Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N barrier and a low Al-content Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N buffer layer. A second approach is the incorporation of acceptor-like deep traps in the buffer which minimizes current injection beneath the depleted channel (Fig. 1). In order to achieve this, an acceptor dopand like iron or carbon has to be added to the GaN buffer. While incorporation of iron needs an extrinsic dopant source (for example ferrocene), carbon doping of GaN can be achieved by adjusting the growth parameters. Besides, no memory effects in the growth system are expected for carbon in contrast to iron.

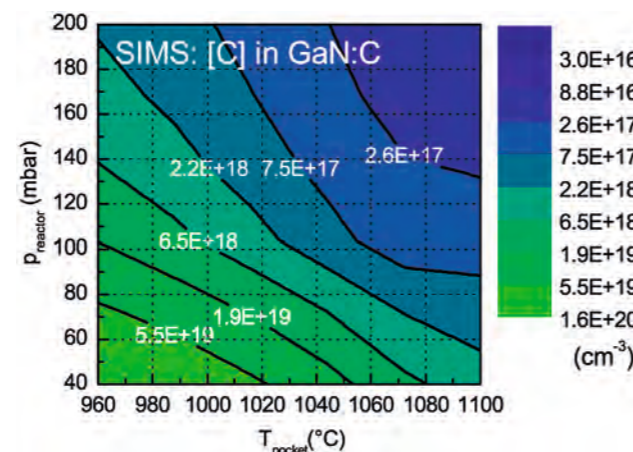


Abb. 2: Mit SIMS-Messungen ermittelte C-Konzentration in GaN:C als Funktion der Suszeptortemperatur ( $T_{\text{pocket}}$ ) und des Reaktor-drucks ( $p_{\text{reaktor}}$ ).  
Fig. 2: Carbon concentration in GaN:C as a function of susceptor temperature ( $T_{\text{pocket}}$ ) and reactor pressure ( $p_{\text{reaktor}}$ ) measured by SIMS.

Die Transistorstrukturen werden mittels Gasphasen-epitaxie in einem Mehrscheibenreaktor auf 3 Zoll 4H-SiC-Substraten abgeschieden. Die Epitaxiestruktur besteht aus einer AlN-Keimschicht, einer ca. 1,5  $\mu\text{m}$  dicken (Al,Ga)N-Schicht als Puffermaterial, die entweder undotiert oder C-dotiert ist. Darauf wird eine dünne undotierte GaN-Schicht abgeschieden, die als Kanal für das zweidimensionale Elektronengas unterhalb der folgenden Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N-Barriere dient. Die Dicke der Kanalschicht ist zunächst ein Optimierungsparameter, da sie sowohl die Durchbruchspannung als auch mögliche Dispersionseffekte beeinflusst. Letztere werden u.a. von Umladungseffekten der tiefen Störstellen bestimmt, die im HF-Betrieb bei hohen Betriebsspannungen zu Leistungs- und Effizienzverlusten führen können. Durch Veränderung der Wachstumsparameter Reaktor-druck, Temperatur und V/III-Verhältnis wurden Kohlenstoff-Dotierungen bis max.  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  erreicht (Abb. 2). Strukturelle und optische Eigenschaften von GaN:C wurden mit Hilfe von hochauflösenden Röntgenmessungen und der Photolumineszenz-Spektroskopie (PL) untersucht. Während die Halbwertsbreite eines asymmetrischen Röntgenreflexes (302) nur eine geringe Verbreiterung mit zunehmender C-Dotierung aufweist, nimmt die PL-Intensität drastisch ab, was auf die Entstehung nichtstrahlender Rekombinationszentren hindeutet.

Transistoren ( $2 \times 125 \mu\text{m}^2$ ) mit unterschiedlichen Puffern zeigen die erwarteten Unterschiede in den gemessenen Durchbruchspannungen ( $V_{\text{br}} = V_{\text{DS}} |_{I_{\text{D}} > 1 \text{ mA}}$ ) (Abb. 3). Auf C-dotiertem GaN-Puffer ( $[C] \sim 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) werden mehr als 1 kV Durchbruchspannung erreicht, was im Vergleich mit veröffentlichten Daten einen Bestwert darstellt.

Epitaxial growth is carried out in a multiwafer MOVPE reactor on 3-inch 4H-SiC substrates. The HFET layer structure consists of an AlN wetting layer, an approximately 1.5  $\mu\text{m}$  thick (Al,Ga)N buffer layer which is either undoped or carbon-doped, subsequently followed by a thin undoped GaN channel layer containing the two-dimensional electron gas at the interface to the Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N barrier layer. The thickness of the channel layer is subject of optimization since breakdown voltage and possible dispersion phenomena are affected. Though dispersion effects under RF operation are still under investigation, one possible cause is charging and de-charging of deep traps in the transistor buffer region leading to an efficiency droop at high-power operation. Carbon doping between  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (SIMS detection limit) and  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  was achieved by adjusting reactor pressure, growth temperature and V-III ratio (Fig. 2). High-resolution X-ray diffractometry and photoluminescence (PL) measurements have been used to investigate structural and electrical layer properties. FWHM values for the asymmetric (302) X-ray reflection show only a slight broadening with increasing carbon content. However, PL intensity is reduced drastically due to formation of non-radiative recombination centers in carbon-doped GaN.

Processed HFET devices ( $2 \times 125 \mu\text{m}^2$ ) containing different buffer layers show the expected differences in measured breakdown voltage ( $V_{\text{br}} = V_{\text{DS}} |_{I_{\text{D}} > 1 \text{ mA}}$ ) (Fig. 3). Using a carbon doping of about  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  in the GaN buffer layer, breakdown voltages of more than 1000 V (measurement limit) were achieved. In combination with the demonstrated low on-resistance  $R_{\text{on}}$ , these values are among the best published to date.

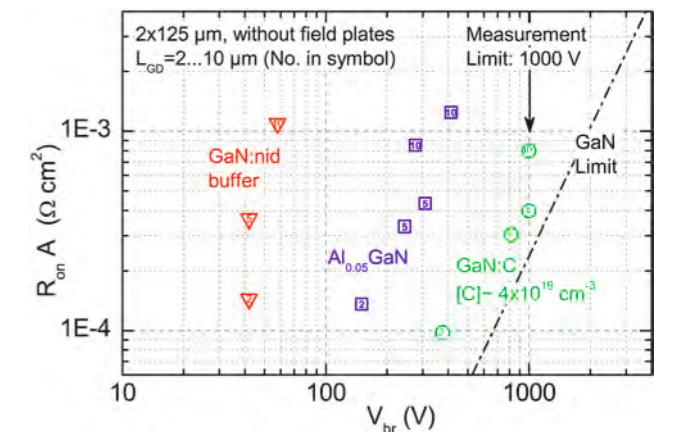


Abb. 3: Spezifischer Einschaltwiderstand als Funktion der Durchbruchspannung für  $2 \times 125 \mu\text{m}^2$  große Transistorstrukturen mit unterschiedlichem Puffermaterial.  
Fig. 3: Specific on-resistance as a function of breakdown voltage for  $2 \times 125 \mu\text{m}^2$  transistors with different buffer material.

## Veröffentlichungen // Publications

E. Bahat-Treidel, O. Hilt, F. Brunner, J. Würfl, G. Tränkle, „Punchthrough-Voltage Enhancement of AlGa<sub>x</sub>N/GaN HEMTs Using AlGa<sub>x</sub>N Double-Heterojunction Confinement”, IEEE Trans. Electr. Dev. 55, 3354 (2008).

F. Brunner, E. Bahat-Treidel, O. Hilt, J. Würfl and M. Weyers, „Growth and Characterization of AlGa<sub>x</sub>N-GaN HFETs on 3-inch 4H-SiC designed for High-Voltage Operation”, Proceed. ICNS-8, p. 833 (2009).

## UV-PHOTODETEKTOREN AUF DER BASIS VON SILIZIUMCARBID (SiC)

SiC-basierte Photodetektoren gehören zu den leistungsfähigsten derzeit erhältlichen Halbleiter-UV-Detektoren im UV-Bereich von 200 nm bis 380 nm. Sie finden vielfältigen Einsatz etwa bei der Überwachung und Steuerung von Anlagen zur UV-Desinfektion (Entkeimung von Luft und Wasser), Härtung von Lacken und Klebstoffen, in-situ Flammenkontrolle und beim Arbeitsschutz. Sie zeichnen sich insbesondere durch ihre Unempfindlichkeit für sichtbare Strahlung (hohe "visible blindness" von  $> 10^4$ ), einen sehr niedrigen Dunkelstrom von  $< 5$  fA und die große Strahlungshärte aus.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) und dem Berliner Unternehmen *sglux* SolGel Technologies GmbH hat das Ferdinand-Braun-Institut die Technologie zur Herstellung von SiC-Photodetektoren entwickelt; erste Bauelemente wurden hergestellt (Abb. 1). Die Funktionsweise basiert auf einem epitaktisch erzeugten p-n-Übergang im Material Siliziumcarbid. Die Epitaxieschichten wurden am IKZ auf n-dotierten 4H-SiC-Substraten gewachsen. Anschließend wurden die 2"-Wafer am FBH prozessiert und bei *sglux* charakterisiert und vereinzelt. Die Chips haben auf der p-dotierten Vorderseite ein strukturiertes Kontaktmetall mit Bondfläche (Abb. 2) und auf der Rückseite einen großflächigen n-Kontakt. In Abb. 3 sind die spektralen Empfindlichkeiten von SiC-Photodioden dargestellt, deren Epitaxieschichten am IKZ auf 4H-Polytyp und durch einen kommerziellen Anbieter auf 6H gewachsen wurden. Die Unterschiede lassen sich auf das Substrat und die unterschiedliche Tiefe des p-n-Überganges (Dicke der p-Schicht) zurückführen.

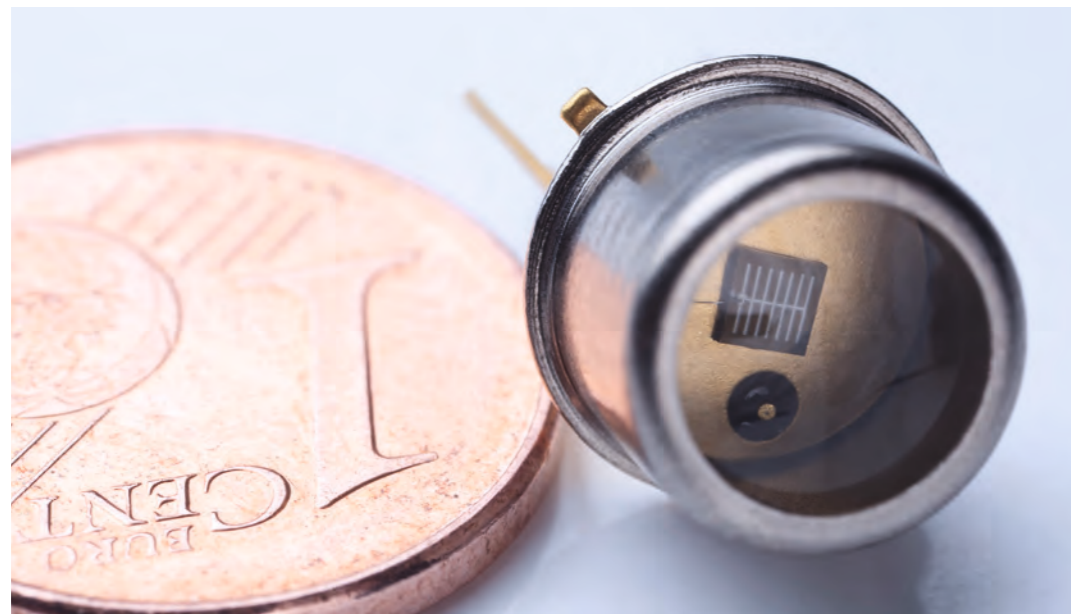


Abb. 1: UV-Photodiode im Gehäuse. Die Kantenlänge des quadratischen Chips beträgt 2 mm.  
Fig. 1: Packaged UV photo diode. The edge length of the square chip is 2 mm.

## SILICON CARBIDE (SiC)-BASED UV PHOTO DETECTORS

SiC-based photo detectors belong to the most efficient semiconductor UV detectors currently available in the UV range between 200 nm and 380 nm. Applications are versatile and include supervision and control of UV disinfection (sterilization of air and water) as well as of UV curing of varnish and adhesives, in-situ flame control and industrial safety. These detectors are characterized by their insensitivity to visible radiation (high "visible blindness" of  $> 10^4$ ), a very low dark current of  $< 5$  fA and very high radiation hardness.

In cooperation with Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ) and Berlin-based *sglux* SolGel Technologies GmbH, the Ferdinand-Braun-Institut has developed the technology for the production of SiC photo detectors. First functional devices were fabricated (Fig. 1). The functionality bases on an epitaxially grown p-n junction in the SiC material. Epitaxial layers have been grown at IKZ on n-type 4H SiC substrates. The 2" wafers were processed at FBH and subsequently characterized and diced by *sglux*. On the p-doped front the chips have a structured contact metal with bond pad (Fig. 2) and a planar contact at the n-type back side. Fig. 3 shows the spectral responsivity of SiC photo diodes with epitaxy grown at IKZ on 4H polytype compared to identically processed diodes with epitaxy grown on 6H substrate by a commercial supplier. The difference in spectral responsivity is due to the different substrate and the different depth of the p-n junctions (thickness of the p layer).

Aufbauend auf Erfahrungen bei der Strukturierung von SiC als Substratmaterial für Hochleistungstransistoren (Laserbohren und Plasmaätzen von Vias) wurden am FBH erstmals SiC-basierte Bauelemente realisiert. Die besonderen Herausforderungen bestanden in der Entwicklung von Strukturierungsverfahren und der elektrischen Kontaktierung von p- und n-dotierten SiC-Schichten.

Auf Grund der chemischen Widerstandsfähigkeit von SiC sind für die Strukturierung spezielle Plasmaätzverfahren (Inductively Coupled Plasma – ICP) erforderlich. Das trockenchemische ICP-Ätzen erfolgte mit einem  $\text{Cl}_2\text{-BCl}_3$ -Gemisch, wobei eine ausreichende Stabilität der Hartmasken während der Ätzdauer, eine hohe Homogenität über die Waferoberfläche und die präzise Steuerung der Ätztiefe zu sichern war. Es wurden Ätzrezepte sowohl für flache Ätzungen (zur Entfernung der p<sup>+</sup>-Deckschicht) wie auch für tiefe Ätzungen (zur elektrischen Isolation der Bauelemente) entwickelt.

Auf Halbleitern mit großer Bandlücke ist die Herstellung Ohmscher Kontakte schwierig. Für den Kontakt zu n-SiC wurde Ni/Cr durch Sputtern auf die Rückseite der Substrate aufgebracht. Den Ohmschen Kontakt zur vorderseitigen p-Schicht bildet Ti/Al. Es wurde festgestellt, dass gesputterte Metallschichten deutlich geringere Kontaktwiderstände ermöglichen als aufgedampfte Schichten.

Die laufenden Arbeiten konzentrieren sich auf die Absenkung der Kontaktwiderstände und die Verringerung des Dunkelstroms.

Based on the experience of structuring the SiC substrate material for high-power transistors (laser drilling and plasma etching of vias), for the first time FBH realized SiC-based devices. Particularly challenging was the development of SiC structuring technologies and the formation of electrical contacts to p- and n-doped SiC layers.

Due to its chemical resistance a special plasma etching technology (Inductively Coupled Plasma – ICP) is necessary to structure SiC. The dry-chemical ICP etching with a  $\text{Cl}_2\text{-BCl}_3$  mixture requires a hard mask that is sufficiently stable during the etch process. The etching technology has to assure a high wafer surface homogeneity and exact control of the etch thickness. Etch recipes for shallow etching (removal of p<sup>+</sup>-cap layer) as well as for deep etching (to electrically separate the active devices) have been developed.

The realization of Ohmic contacts on semiconductors with a wide band gap is demanding. To contact the bottom n-type SiC Ni/Cr was sputtered and the contact to the top p-type layer was formed by Ti/Al. It was found that sputtered p-contact metals have considerably lower contact resistance compared to evaporated metal structures.

Further activities at FBH focus on improvements in Ohmic contact resistance on p-SiC and the reduction of dark current of the diodes.

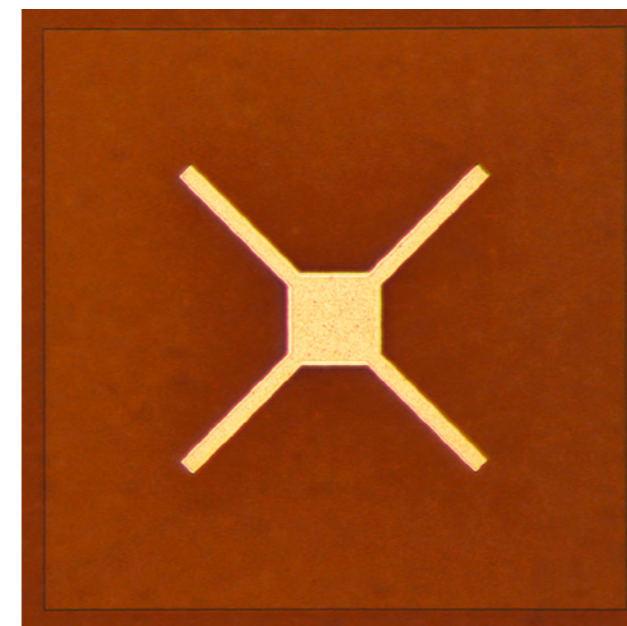


Abb. 2: Lichtmikroskopisches Bild der Vorderseite einer Photodiode nach dem Prozess. Der elektrische Kontakt hat eine zentrale Bondinsel und ist hell erkennbar. Die Kantenlänge des aktiven Bereichs der quadratischen Diode ist 1 mm.

Fig. 2: Optical micrograph of the front of a processed photo diode. The electrical contact has a bonding island in the center (bright). The edge length of the active area of the square chip is 1 mm.

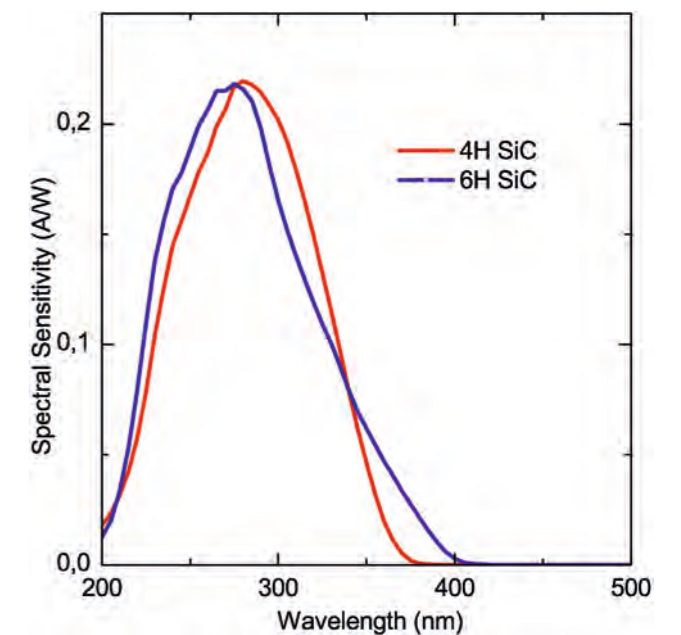


Abb. 3: Spektrale Empfindlichkeit von SiC-Photodioden auf n-dotiertem SiC-Substrat aus 4H- und 6H-Polytyp mit einer p-dotierten Schichtdicke von 150 nm (6H) bzw. 300 nm (4H). Messungen von *sglux* SolGel Technologies GmbH.

Fig. 3: Spectral responsivity of SiC photo diodes on n-doped 4H and 6H polytype substrates with a p-layer thickness of 150 nm (6H) and 300 nm (4H), respectively. Measurements by *sglux* SolGel Technologies GmbH.



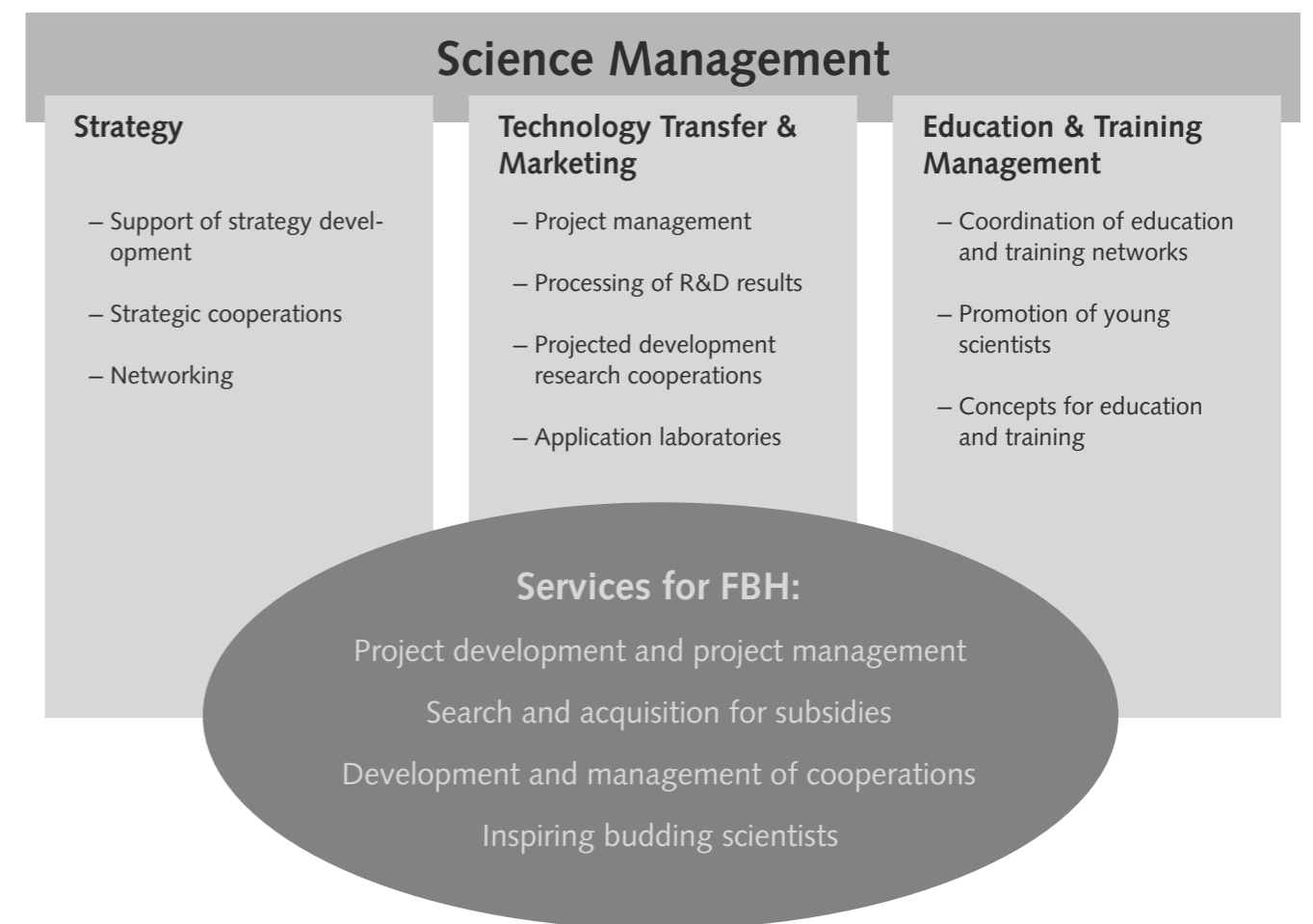
# GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

## ABTEILUNG WISSENSCHAFTSMANAGEMENT – STRATEGIE, TECHNOLOGIE-TRANSFER & MARKETING, BILDUNGS-MANAGEMENT

2009 baute der Geschäftsbereich Netzwerke seine Aktivitäten insbesondere zur Unterstützung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie der Institutsleitung weiter aus. Die zum Jahreswechsel eingeleitete Umstrukturierung zur Abteilung Wissenschaftsmanagement (siehe Schlaglichter) unterstützt diese Entwicklung. Das interdisziplinäre Team ordnet sich zukünftig drei Säulen zu: Strategie, Technologietransfer & Marketing und Bildungsmanagement. Insbesondere in den ersten beiden Bereichen entwickelt die Abteilung Serviceangebote für das FBH. In 2009 konnten einige neue Vorhaben in allen drei Arbeitsschwerpunkten erfolgreich auf den Weg gebracht werden. Vor allem bei komplexen Verbundprojekten zeigte sich bereits während der Projektentwicklungs- und Antragsphase der Mehrwert der Wissenschaftsmanager/-innen, die sich um Koordination, Organisation und das administrative Projektmanagement kümmern, während sich die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler voll auf die FuE-Inhalte konzentrieren konnten.

## SCIENCE MANAGEMENT DEPARTMENT – STRATEGY, TECHNOLOGY TRANSFER & MARKETING, EDUCATION AND TRAINING MANAGEMENT

In 2009, the Business Area Networks continued to expand its activities, particularly to provide support to the FBH's scientists and the institute's management. Restructuring as the Science Management Department (see Highlights), which commenced at the start of the year, supported this development. In the future, the interdisciplinary team will focus on three main areas: Strategy, Technology Transfer & Marketing, and Education and Training Management. The department offers services for the FBH, specifically in the first two areas. Numerous new projects were successfully implemented in all three key activities in 2009. The additional benefit of the science managers was clearly demonstrated during the project development and application phase of complex joint projects, as they were able to deal with coordination, organization and administrative project management, while the involved scientists were able to concentrate on research and development.



## STRATEGISCHE KOOPERATIONEN & NETZWERKE

Im Bereich Strategie werden die Technologieinitiativen, strukturellen Kooperationen und strategischen Netzwerke koordiniert. Insbesondere die Arbeiten zum regionalen Wachstumskern "Berlin WideBaSe" wurden 2009 vorangetrieben, was im November zu einer positiven Förderempfehlung im Rahmen eines Assessment-Centers geführt hat. Auch das seit Jahren am FBH angesiedelte Zentrum für Mikrosystemtechnik Berlin sowie die Unterstützung des Institutsleiters Günther Tränkle im Rahmen seines Vorstandsvorsitzes von OpTecBB, dem regionalen Kompetenznetz der Optischen Technologien, gehören zu den strategischen Arbeiten. Aus diesen beiden Initiativen ergibt sich die Mitarbeit am Berliner Kompetenzfeld Optische Technologien und Mikrosystemtechnik, was im Rahmen der kohärenten Innovationsstrategie von Berlin zur Stärkung der regionalen Technologieschwerpunkte führen soll.

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Kooperation im Leibniz-Kontext. Auf Initiative des FBH starteten 2009 mit dem Leibniz-Transferverbund Mikroelektronik sowie dem Leibniz-Applikationslabor MiTOS zwei neue Vorhaben. Ebenfalls 2009 wurde Günther Tränkle zum Präsidiumsbeauftragten für Wissens- und Technologietransfer berufen. In enger Zusammenarbeit mit der Leibniz-Geschäftsstelle unterstützt das Team der Abteilung Wissenschaftsmanagement die Strategieentwicklung des Technologietransfers für die Leibniz-Gemeinschaft.

### ZEMI – Regional vernetzt in der Mikrosystemtechnik

Das Zentrum für Mikrosystemtechnik Berlin (ZEMI) mit der Geschäftsstelle am Ferdinand-Braun-Institut ist eine Arbeitsgemeinschaft mehrerer großer Berliner Forschungseinrichtungen, in der das regionale Forschungs- und Entwicklungspotenzial in der Mikrosystemtechnik vernetzt ist. ZEMI präsentiert jährlich aktuelle Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik bei der Microsystems Summer School in Berlin. Die diesjährige 4. Sommeruni wurde erfolgreich in Zusammenarbeit mit den ZEMI-Partnern sowie vier regionalen Unternehmen für Studierende, Diplomanden/-innen, Doktoranden/-innen und Unternehmensmitarbeiter/-innen veranstaltet.

Im Kontext der kohärenten Innovationsstrategie des Landes Berlin hat ZEMI wirtschaftlich relevante Handlungsfelder für die Mikrosystemtechnik in Berlin-Brandenburg herausgearbeitet, die inhaltlich aus- und aufgebaut werden. Für das Handlungsfeld "Ambient Assisted Living" entwickelt die ZEMI-Geschäftsstelle derzeit mit Unterstützung der ZEMI-Partner und der Partner im Vorhaben "MIDIS" neue, auf Mikrosystemtechnik basierende, Dienstleistungen für Senioren.

## STRATEGIC COOPERATIONS & NETWORKS

Technology initiatives, structural cooperations and strategic networks are coordinated in the strategy area. In 2009, emphasis was, in particular, placed on the work to develop a regional center of growth "Berlin WideBaSe", resulting in a positive funding recommendation within the framework of an Assessment Center in November. The strategic tasks also involved the Center for Microsystems Technology Berlin (ZEMI), which has its office at the FBH since many years, as well as the provision of support for the institute's director Günther Tränkle within his role as chairman of OpTecBB, the regional competence network for optical technologies. These two initiatives result in collaboration with the Berlin-based competence field "Optical and Microsystems Technologies", which should help to strengthen regional technological capabilities within the coherent innovation strategy for the Federal State of Berlin.

The cooperation with the Leibniz Association is a further key area. Two new projects, the Leibniz Technology Transfer Association Microelectronics and the Leibniz Application Laboratory MiTOS, started in 2009 initiated by FBH. Günther Tränkle was also elected as the Executive Board Representative for Knowledge and Technology Transfer in 2009. In close cooperation with the Leibniz Headquarters, the Science Management Department team supports the strategic development of technology transfer for the Leibniz Association.

### ZEMI – Regional Microsystems Technology Network

The Center for Microsystems Technology Berlin (ZEMI), whose office is located at the Ferdinand-Braun-Institut, is an association of several large Berlin-based research institutions which bundles the regional research and development potential in microsystems technology. ZEMI annually presents the latest research and developments in the field of microsystems at the Microsystems Summer School in Berlin. In 2009, the fourth Summer School was successfully organized for undergraduate students, Ph.D. students and company employees in cooperation with the ZEMI partners and four regional companies.

Within the framework of the innovation strategy for the Federal State of Berlin, ZEMI has defined economic relevant operational fields for microsystems technology in Berlin-Brandenburg that will be expanded and enhanced. With the support of its partners and "MIDIS" project partners, ZEMI is currently developing new, microsystems technology-based services for senior citizens in the operational field "Ambient Assisted Living".

## FORSCHUNG PROFITIERT VOM TECHNOLOGIETRANSFER

Die Abteilung Wissenschaftsmanagement konnte 2009 erfolgreich zum Ausbau der Transferaktivitäten des FBH beitragen. Dafür entwickelte das interdisziplinäre Team eine Reihe von Unterstützungsangeboten für die Forschungsabteilungen des FBH: Von der Kontaktabahnung zu Unternehmen und Betreuung der Kunden, über Projektmanagement für wissenschaftliche Projekte, bedarfsgerechte Bildungsangebote und -dienstleistungen bis hin zur Fördermittelrecherche und -akquise. Die Ergebnisse erfolgreichen Technologietransfers kommen ausschließlich dem Institut zugute – vor allem den jeweils beteiligten Forschungsabteilungen. Zusätzliche Einnahmen bedeuten neben der Sicherung und dem Ausbau von hochkompetentem Wissenschaftspersonal auch zusätzliche Mittel für Material und Investitionen. Damit trägt der Technologietransfer wesentlich zur exzellenten Forschung des FBH bei.

### Leibniz-Transferverbund Mikroelektronik

Der Leibniz-Transferverbund Mikroelektronik vernetzt die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mehrerer Leibniz-Institute zur Mikro- und Optoelektronik sowie zur Mikrosystemtechnik und initiiert verwertungsorientierte Kooperationen mit Unternehmen. Er ermöglicht den beteiligten Instituten ihre Forschungsschwerpunkte thematisch aufeinander abzustimmen, am Bedarf von Unternehmen auszurichten und eine gemeinsame Wertschöpfung zu organisieren. Eine Bestandsaufnahme der inhaltlichen Kompetenzen der Einrichtungen führt zu einer Reihe von Schnittmengen, die zielgruppen- und branchenspezifisch unterteilt werden. Forschungs- und Entwicklungsleistungen können somit vereinfacht kommuniziert und neue Märkte erreicht werden. Für Unternehmen bietet der Transferverbund die Möglichkeit, sich schneller einen Überblick über vorhandene Kompetenzen der Partner zu verschaffen und gezielter mit einer geeigneten Forschungseinrichtung in Kontakt zu treten. Eine bedarfsgerechte Kooperation mit Forschungseinrichtungen der Spitzentechnologie wird das Vordringen der Unternehmenspartner in Märkte erleichtern, die bisher nicht erreichbar waren.

### Leibniz-Applikationslabor MiTOS

Mit dem Aufbau eines Applikationslabors hat das FBH eine zusätzliche Schnittstelle zur Wirtschaft geschaffen. MiTOS, das Leibniz-Applikationslabor "Microwave Technology, Optoelectronics and Solid State Electronics", transferiert Forschungsergebnisse in industrielle Anwendungen, indem es praxisnahe Funktionsmuster und Demonstratoren entwickelt. In Zusammenarbeit mit Unternehmen unterstützt MiTOS bedarfsgerecht bei der Entwicklung hochinnovativer Produkte und Verfahren. So entstehen nachhaltige Kooperationsbeziehungen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft, die den Weg

## RESEARCH PROFITS FROM TECHNOLOGY TRANSFER

The Science Management Department successfully contributed to the expansion of the transfer activities of the FBH in 2009. The interdisciplinary team developed a number of special services to support the FBH's research departments: The services range from developing contacts with companies and customer care, through project management for scientific projects, and demand-oriented educational offers and services, to the search and claims for subsidies. The institute, in particular the involved research departments, benefits from the results of successful technology transfers. Besides securing and strengthening highly-skilled scientific staff, additional income also provides increased funds for materials and investments. Technology transfer therefore contributes greatly to the FBH's excellent research work.

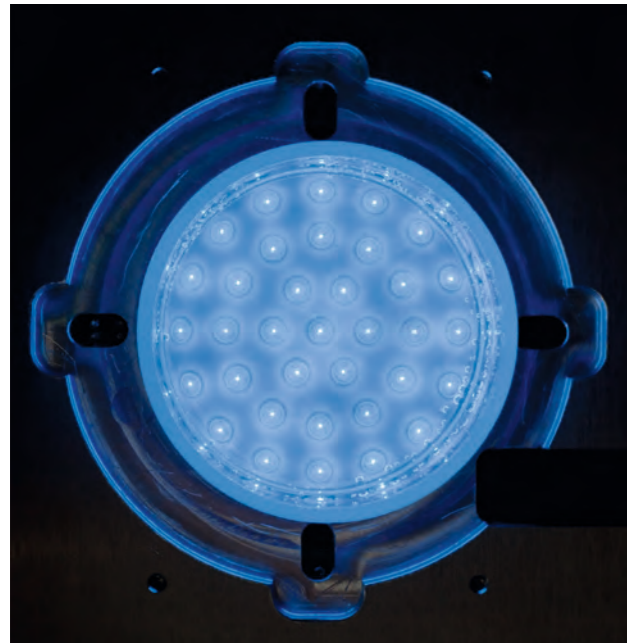
### Leibniz Technology Transfer Association Microelectronics

The Leibniz Technology Transfer Association Microelectronics bundles the research and development of several Leibniz institutes in micro and optoelectronics and microsystems technology, and initiates application-oriented cooperation with companies. It enables the involved institutes to coordinate their research topics, to the needs of companies and to organize joint value. An evaluation of the actual competencies of the institutes leads to a number of overlapping areas, which are subdivided according to target groups and sectors. This facilitates the communication of research and development performances and access to new markets. The Technology Transfer Association offers the opportunity to achieve a quicker overview of the existing competencies of partners and guarantees more targeted contact to a suitable research institute for companies. Demand-oriented cooperation with high-tech research institutes facilitates the expansion of company partners into markets which previously have been out of reach.

### Leibniz Application Laboratory MiTOS

The FBH has created an additional industry interface with the foundation of an application laboratory. MiTOS, the Leibniz Application Laboratory "Microwave Technology, Optoelectronics and Solid State Electronics", transfers research results into industrial applications by developing realistic experimental models and demonstrators. In cooperation with companies, MiTOS provides demand-oriented support for the development of highly-innovative products and procedures. This guarantees sustainable cooperation between industry and science, helping to quicken the process from research result to product.

vom Forschungsergebnis zum Produkt verkürzen. Im Applikationslabor bündeln das FBH, und das Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) ihre Kompetenzen bei III/V-Halbleitertechnologien. Ihre Forschungsergebnisse entwickeln sie hier für spezifische Anwendungen gemeinsam weiter und stellen ihr weltweit einmaliges Technologiepotenzial zur Verfügung. So können am PDI entwickelte Halbleiterstrukturen, mit denen die Lichterzeugung bei Leuchtdioden und Lasern effizienter wird, in der Lasertechnologie des FBH für neuartige Lichtquellen eingesetzt werden. Ein weiteres gemeinsames Arbeitsgebiet mit hohem Verwertungspotenzial ist das Schichtwachstum von Indiumphosphid auf Silizium und damit die Herstellung von III/V-Strukturen und Bauelementen auf Silizium.



Modul zur Wasserdeseinfektion, links Array von UV-LEDs, rechts Aufsatz für fließendes Wasser. Ein Projekt innerhalb des Applikationslabores.  
Module for disinfecting water, left array of UV LEDs, right attachment for running water. One of the projects within the application laboratory.

MiTOS ist eine Anlaufstelle für Unternehmen, Hochschulen und Institute und bietet vor dem Hintergrund einmaliger Forschungs- und Technologiekompetenz sowie modernster Laborausstattung der Forschungseinrichtungen umfangreiche Unterstützung für Produkt- und Verfahrensentwicklungen. Kleine Teams aus Ingenieuren und Naturwissenschaftlern ergänzen das Forschungs-Know-how durch praxisorientierte Applikationen.

#### Die Applikationsteams

- demonstrieren Machbarkeit und Umsetzbarkeit durch die Entwicklung von Produktmodellen,
- unterstützen und beraten insbesondere KMU bei der Produktentwicklung und
- präsentieren Zukunftstechnologien.

The FBH and the Paul Drude Institute for Solid State Electronics (PDI) consolidate their competencies in the Application Laboratory for III-V semiconductor technologies. Together they further develop research results for specific applications, ensuring their unique technology potential becomes a reality. For example, semiconductor structures developed at the PDI which ensure more efficient light generation for light emitting diodes and lasers can be used in the FBH's laser technology to create innovative light sources. Another joint field of activity with high commercialization potential is the layer growth of indium phosphide on silicon, i.e. the production of III-V structures and devices on silicon.



MiTOS acts as a central contact point for companies, universities and institutes and provides extensive support for product and process developments due to the unique research and technology competencies and state-of-the-art laboratory equipment of the research institutes. Small teams of engineers and natural scientists help to advance the research know-how with practice-oriented applications.

#### The application teams

- demonstrate feasibility and practicability by developing product models,
- support and advise, in particular, small and medium-sized companies during product development and
- present future technologies.

Das Applikationslabor des FBH baut auf vorhandenen Kompetenzen in Optoelektronik und Mikrowellentechnik auf. MiTOS entwickelt Labormuster zu Funktionsmodellen für den praktischen Einsatz weiter. Aktuelle Beispiele sind Pikosekunden-Lichtquellen mit integriertem Pulspicker zur Einstellung von Pulsauern und zur Verstärkung von Laserpulsen, UV-Leuchtdioden zur Trinkwasserdesinfektion oder atmosphärische Mikrowellen-Plasmaquellen, die in medizinischen und industriellen Anwendungen eingesetzt werden können.

#### VALORES – Strategische Kooperation zur Forschungsverwertung

Das Vorhaben VALORES – Valorization of Research Strategic Cooperation of Institutes – zielt auf die Zusammenarbeit des FBH und des Greifswalder Leibniz-Instituts für Plasmaforschung und Technologie (INP) bei der Verwertung ihrer Forschung. An beiden Instituten wurden zunächst die vorhandenen Verwertungsaktivitäten erfasst und einer SWOT-Analyse unterzogen. Die Ergebnisse fließen in Marketingkonzepte sowie einen Verwertungs-Leitfaden für Wissenschaftler/-innen ein. In einem Pilotprojekt werden modellhaft Transferaktivitäten begleitet und evaluiert.

VALORES erarbeitet Instrumente für die weitere strategische Ausrichtung der Forschungsverwertung und unterstützt den systematischen Ausbau von Forschungsk Kooperationen, industriellen Forschungsaufträgen und Ausgründungen. Das Vorhaben trägt dazu bei, dass aus institutsübergreifenden Kooperationen schneller Systemlösungen entstehen, die von Industriepartnern vermarktet werden können. Als Unterstützung für andere Leibniz-Institute werden die Ergebnisse aus VALORES mit dem Leitfaden in der Leibniz-Gemeinschaft vorgestellt.

The FBH application laboratory is based on existing skills in optoelectronics and microwave technology. MiTOS further develops laboratory models into functional models for practical usage. Current examples are pico-second light sources with integrated pulse picker for selecting pulse durations and amplifying laser pulses, UV LEDs for disinfecting drinking water, and atmospheric microwave-plasma sources that can be used in medical and industrial applications.

#### VALORES – Strategic Cooperation for Research Valorization

The VALORES – Valorization of Research Strategic Cooperation of Institutes – project aims at expanding cooperation between the FBH and the Leibniz Institute for Plasma Science and Technology (INP) in Greifswald, allowing improved utilization of research within the institutes. Existing valorization activities were initially assessed at both institutes and subsequently subjected to a SWOT analysis. The results are incorporated into marketing concepts and utilization guidelines for scientists. In a pilot project, transfer activities are accompanied and evaluated on a model basis.

VALORES develops instruments for the further strategic alignment of research valorization and supports the systematic expansion of cooperative research projects, industrial contract research and start-ups. The project helps to ensure that inter-institutional cooperation results in faster system solutions, which can then be marketed by industrial partners. To offer support to other Leibniz institutes, VALORES results are presented together with the guidelines for the Leibniz Association.



VALORES bringt Forschungsergebnisse in die Anwendung, z. B. bei der Oberflächenaktivierung mit Plasmen.  
VALORES brings research results into application, like e.g. surface activation with plasma.

## BILDUNGSMANAGEMENT – ERFOLGREICHE NETZWERKSTRUKTUREN

Am FBH wurde im Laufe der letzten Jahre ein umfassendes Netzwerk aus Initiativen, Kooperationen und Veranstaltungen in der Aus-, Weiter- und Fortbildung sowie in der Nachwuchsförderung geschaffen. Ein Ziel ist es, das Interesse von Schülerinnen und Schülern an technischen Themen möglichst frühzeitig zu wecken und sie nachhaltig für Naturwissenschaften zu begeistern. Wissenschaft soll nachvollziehbar, spannend und anwendbar sein und junge Menschen sollen gezielt zu einem naturwissenschaftlich-technischen Beruf oder Studium ermutigt sowie bei der Berufs- und Studienwahl unterstützt werden.

Die Aktivitäten des FBH sind auch eine Folge des spürbaren Fachkräftemangels – zahlreiche Stellen bleiben unbesetzt – und der relativ niedrigen Studierendenzahl in den naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen. Um die Zukunftsfähigkeit des Institutes und den wissenschaftlichen Nachwuchs zu sichern, kooperiert das FBH eng mit naturwissenschaftlich orientierten Schulen. Dies sind insbesondere das Oberstufenzentrum für Chemie, Physik und Biologie, Lise-Meitner-Schule (LMS) und die Alexander-von-Humboldt-Oberschule (AvH), ein Gymnasium, das mathematisch-naturwissenschaftliche Profilklassen ab Sekundarstufe I bietet.

Die AvH und das FBH bieten während des gesamten Schuljahres interessierten Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, an spezifischen Projekten, wie beispielsweise der Laser AG teilzunehmen. Dabei lernen die Jugendlichen in praktischen Versuchen, Experimenten und Messungen im Labor die Grundprinzipien der Forschung am FBH. Ein Highlight der langjährigen engen Zusammenarbeit mit der Lise-Meitner-Schule ist das seit 2005 gemeinsam betriebene Schülerlabor MicroLAB. Hier erfahren Schüler/-innen aber auch Lehrkräfte wie Mikrochips entstehen und führen selbst typische Arbeitsschritte zur Strukturierung von Halbleiter-Bauelementen durch.

FBH und Lise-Meitner-Schule arbeiten darüber hinaus im Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin (ANH Berlin) zusammen. Gemeinsam berät und unterstützt das Team Betriebe aus dem Raum Berlin-Brandenburg in allen Fragen rund um die duale Ausbildung in der Mikrosystemtechnik, der Optischen- und der Nanotechnologien sowie der Solarbranche / Photovoltaik. Außerdem informiert das ANH Berlin-Team Schülerinnen und Schüler über Berufsbilder in Hochtechnologien und initiiert Kontakte zwischen Schulen und Betrieben. Insbesondere Unternehmen die bisher nicht ausbilden, wurden durch die Unterstützung des Netzwerkes ermutigt, in die Ausbildung von Mikrotechnologen einzusteigen. So werden beispielsweise Partnerbetriebe vermittelt sowie zentrale Lehrgänge organisiert, um einem Betrieb die Berufsausbildung in der Mikrotechnologie zu ermög-

## EDUCATION AND TRAINING MANAGEMENT – SUCCESSFUL NETWORK STRUCTURES

In recent years, an extensive network of initiatives, cooperations and events engaged in dealing with education, training and further training as well as the promotion of young scientists has been established at the FBH. The aim of this network is to increase the interest of young people in technical matters as early as possible and to effectively nurture their enthusiasm for natural sciences. Science should be comprehensible, exciting and feasible, and young people should be encouraged to consider a future scientific-technical career or studies and be provided with everything they need to know when choosing a career or university course.

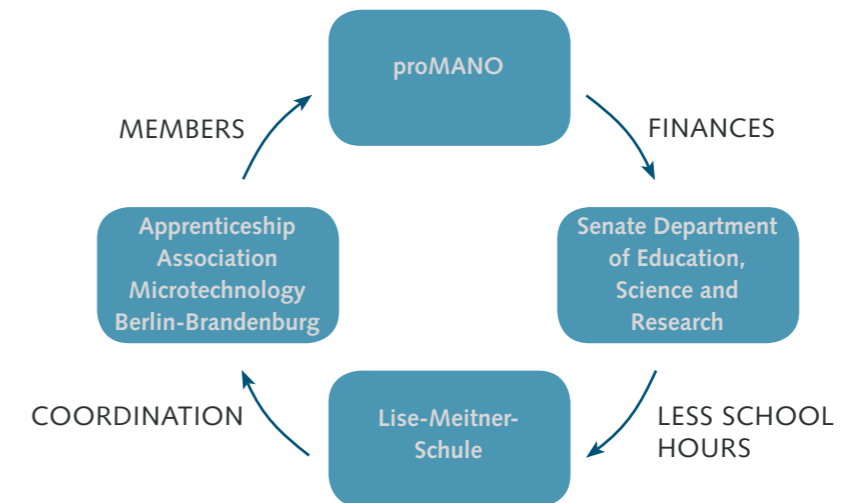
The FBH's activities are also a result of the major shortage of skilled staff – many positions remain vacant – and the relatively low number of students on scientific-technical courses. To secure the future viability of the institute and to inspire future generations of scientists, the FBH works in close cooperation with schools with a science-based curriculum: In particular, with the OSZ Lise-Meitner-Schule (School of Science Berlin) and the Alexander-von-Humboldt-Oberschule (AvH), a high school which provides classes specializing in mathematical-scientific topics.

The AvH and the FBH offer interested pupils the opportunity to participate in specific projects, e.g. the Laser Study Group, during the entire school year. The youngsters learn basic research principles of the FBH while carrying out tests, experiments and measurements in a real laboratory. One highlight of the intensive long-term cooperation with the Lise-Meitner-Schule is the joint school laboratory MicroLAB, which has been in operation since 2005. Pupils as well as teachers use the facilities to learn how microchips are produced and to gain hands-on experience in the typical structuring of semiconductor devices.

Furthermore, the FBH and the Lise-Meitner-Schule cooperate in the High-Technology Education Network Berlin (ANH Berlin). Together the team provides advice and support to companies from the Berlin-Brandenburg region in questions regarding dual education in microsystems technology, optical and nanotechnologies as well as the solar sector / photovoltaics. The ANH Berlin team also informs pupils about high-technology careers and promotes contacts between schools and companies. Companies which previously have not offered apprenticeships are encouraged to specifically train people as microtechnologists with the support of the network. For example, partner companies are selected and central training courses are organized in order to facilitate the provision and development of microtechnology apprenticeships. The Apprenticeship Association Microtechnology Berlin-Brandenburg has been active in this particular

lichen. In diesem Feld ist insbesondere der Ausbildungsverbund Mikrotechnologie Berlin-Brandenburg seit vielen Jahren aktiv. 2009 trat das FBH mit anderen Ausbildungsbetrieben dem gemeinnützigen Verein proMANO e.V. bei, der nun die weitere Arbeit des Ausbildungsverbundes leitet. So konnte 2009 ein neues Finanzierungsmodell umgesetzt werden. Es basiert auf Mitgliedsbeiträgen und weiteren Einnahmen des Vereins und ermöglicht die Arbeit eines Fachlehrers der Lise-Meitner-Schule für das Netzwerk (Grafik).

area for many years. In 2009, the FBH and other companies which offer apprenticeship programmes joined the non-profit organization proMANO e.V., which now manages the work of the Apprentice Association. This enabled the implementation of a new financing model in 2009. It is based on membership fees and further income generated by the association and allows the integration of a teacher from the Lise-Meitner-Schule within the network (illustration).



Finanzierungsmodell für den Ausbildungsverbund Mikrotechnologie Berlin-Brandenburg.  
Financing model for the Apprenticeship Association Microtechnology Berlin-Brandenburg.

Das FBH zeigt mit seinen Aktivitäten jungen Menschen, dass Naturwissenschaften und Technik Spaß machen und ein breites Spektrum an Berufsbildern und Studienmöglichkeiten mit sehr guten Zukunftsaussichten bieten. Auch Mädchen sollen für die technisch-naturwissenschaftlichen Fächer interessiert werden. Daher engagiert sich das FBH auch im bundesweiten Vorhaben "mstlfemNet meets Nano and Optics" und im Rahmen von ZEMI im "Nationalen Pakt für Frauen in MINT-Berufen".

### Mädchen machen MINT – Verbundprojekt "mstlfemNet meets Nano and Optics"

Noch immer gibt es nur wenige Frauen in den ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fächern. Daher startete im Rahmen des Nationalen Pakts für Frauen in MINT-Berufen im Frühjahr 2009 das bundesweite Vorhaben mstlfemNet meets Nano and Optics. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung arbeiten Partner in sieben Bundesländern daran, künftig mehr Mädchen und junge Frauen für Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT) zu begeistern.

Das zweijährige Vorhaben für die Bundesländer Berlin und Brandenburg wird in der Abteilung Wissenschaftsmanagement koordiniert und greift damit auf die gewachsenen Netzwerke und die Erfahrungen aus

The FBH's activities prove to young people that natural sciences and technology can be fun and also offer a wide range of occupations and higher education courses with excellent prospects for the future. Another goal is to attract the interest of girls in technical-scientific subjects. Therefore, the FBH is also involved in the Germany-wide project "mstlfemNet meets Nano and Optics" and within the scope of ZEMI in the "National Pact for Women in MINT Careers".

### Girls go MINT – "mstlfemNet meets Nano and Optics" project

Women are still a significant minority in engineering and natural science. And this is the reason why the Germany-wide project "mstlfemNet meets Nano and Optics" commenced in the spring of 2009 within the framework of the "National Pact for Women in MINT Careers". The partners of this project promoted by the German Federal Ministry of Education and Research aim to raise awareness of Mathematics, Informatics, Natural Sciences and Technology (MINT) among girls and young women in seven German federal states.

The two-year project for the Federal States of Berlin and Brandenburg is coordinated in the Science Management Department and draws on the developed networks

dem bereits abgeschlossenen Projekt MANO (Mikrosystemtechnik Ausbildung in Nord-Ostdeutschland) zurück. Im Mittelpunkt des mstlfemNet-Vorhabens steht ein "Mädchen-Technik-Kongress", im Sommer 2010. Mädchen und junge Frauen aus regionalen Mädchen-MINT-Projekten, die in schulische und außerschulische Technik-Projekte eingebunden sind, werden als Referentinnen ihre Erfahrungen weitergeben. In praxisnahen Experimenten und Mitmach-Aktionen soll das Technik-Interesse von Mädchen der Klassenstufen 7 bis 10 aus Berlin und Brandenburg angesprochen werden. Dazu gibt es Workshops und Foren zu MINT-Ausbildungsberufen und Studienmöglichkeiten. Zudem stehen Auszubildende und Wissenschaftlerinnen als Role-Models zur Verfügung und berichten aus ihrem Ausbildungs-, Studiums- und Berufsalltag.



Junge Frauen für Hochtechnologien zu begeistern ist ein Ziel des Projektes "mstlfemNet meets Nano and Optics".  
The aim of the "mstlfemNet meets Nano and Optics" project is to capture the enthusiasm of young women for high-technology jobs.

Die Erfahrung aus den bisherigen Netzwerken zeigt, dass der aktive Meinungs- und Erfahrungsaustausch der Akteur/-innen und Multiplikator/-innen aus Mädchenarbeit, Nachwuchsförderung, Schule, Berufsberatung und Personalentwicklung zentral für die erfolgreiche Arbeit ist. Daher wurden die vielfältigen regionalen MINT-Akteure in Berlin und Brandenburg an einen Tisch gebracht und in das Netzwerk einbezogen. So können Erfahrungen gebündelt, Synergien identifiziert, und gemeinsame Veranstaltungen initiiert werden. Angestrebt wird, die zuständigen politischen Institutionen aktiv in die Diskussion an den Runden Tischen mit einzubeziehen, um so die Förderung für MINT-Fächer nachhaltig zu verankern. Mit diesem Maßnahmenpaket trägt "mstlfemNet meets Nano and Optics" zur Sicherung des Fachkräftebedarfs in MINT-Berufen in Berlin und Brandenburg bei.

and experience resulting from the completed project "MANO" (Microsystems Technology Education in North-East Germany). The highlight of the mstlfemNet project is a "Technology Congress for Girls" in the summer of 2010. Girls and young women from regional MINT projects who are involved in school and out-of-school technology projects will present their experiences and share their knowledge. The organizers hope that realistic experiments and hands-on events will capture the interest of girls (class 7 to 10) from Berlin and Brandenburg in technology. It includes workshops and forums about MINT apprenticeships and university courses. Moreover, apprentices and scientists will act as role models and report on life as an apprentice, student and professional in MINT courses.

Experience from previous networks shows that an active exchange of views and experiences between participants and key influencers who work with girls, promote young scientists, teach in schools, offer careers advice and develop human resources is essential for successful performance. The numerous regional MINT players in Berlin and Brandenburg were therefore brought together and integrated into the network. This enables the grouping of experiences, the identification of synergies and the initialization of joint events. An attempt is also made to actively involve the relevant political institutions in round table discussions in order to establish the promotion and funding of MINT subjects for the future. The "mstlfemNet meets Nano and Optics" project uses this package of measures to actively meet the demand for skilled labor in MINT jobs throughout Berlin and Brandenburg.

## IMPRESSUM // IMPRINT

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

### Redaktion // Editors

Gisela Gurr, Petra Immerz

### Fotos & Grafiken // Images & Graphics

M. Schönenberger: p. 1  
B. Schurian: pp. 10, 12 [1,2], 21, 24, 25, 29, 31 [1,2], 34, 41, 47, 58 [1], 68 [1], 73, 75, 77 [1], 78 [3b], 88, 105, 108, 116 [1,2], 117  
TU Berlin: p. 22  
Universität Wien : pp. 100, 101 [2,3]  
FH Kaiserslautern: p. 120  
Weitere // Further - FBH

### Layout & Satz // Layout & Typesetting

nana giorgadze - Studio Ralf Grömminger

### Druck // Printing

CRIS GmbH

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

© Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik,  
Berlin 2010