



JAHRESBERICHT

2008

ANNUAL REPORT



2008 war für das Ferdinand-Braun-Institut ein Jahr der Konsolidierung. Nachdem wir im Jahr zuvor eine neue Organisationsstruktur eingeführt hatten, um auf wachsende Mitarbeiterzahlen und Projekte reagieren zu können, hat sich diese Matrixstruktur im ersten Jahr der Umsetzung bewährt. Es ist uns nun mit den fünf neu geschaffenen Geschäftsbereichen möglich, unser Leistungsspektrum und unsere Angebote für Partner und Kunden aus Forschung und Industrie transparent nach außen zu präsentieren und flexibel auf Anforderungen zu reagieren.

Auch unsere wegweisenden Kooperationen mit den Berliner Hochschulen, in denen wir reguläre Professoren verantwortlich in unsere Leitungsstrukturen einbinden, haben wir ausgebaut und weiterentwickelt. In integrierten Teams arbeiten die gemeinsamen Mitarbeiter abgestimmt und freundschaftlich zusammen. Neu hinzugekommen ist in 2008 die Kooperation mit der Humboldt-Universität zu Berlin in der Lasermetrologie. Hier sind am FBH inzwischen bereits vier wissenschaftliche Mitarbeiter und Doktoranden aktiv.

Erfreulicherweise wurden unsere elektronischen und optischen Komponenten und Module aus III/V-Halbleitern als Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität erneut rege nachgefragt. Das Spektrum unserer Forschungsarbeiten reichte wie in den vergangenen Jahren von der Bearbeitung grundlegender Fragestellungen, etwa im Bereich der Hybridgasphasenepitaxie zur Herstellung freistehender Galliumnitridsubstrate, bis hin zur Fertigung spezifischer Kleinserien. Immer häufiger gelingt uns dabei in strategischen Partnerschaften die Realisie-

2008 was a year of consolidation for the Ferdinand-Braun-Institut. In response to the growing number of employees and projects, we introduced a new organizational matrix structure one year ago, which has proven to be successful in its first year after implementation. With the five newly introduced business areas it is now possible for us to clearly present our topics and offers in research and development to our partners and customers as well as to flexibly meet their demands.

Additionally, the innovative cooperations with local universities, in which we integrate regular professors very successfully into our management structures, have been further extended and advanced. Co-workers of FBH and Berlin universities are routinely cooperating in integrated teams. In 2008, a cooperation in laser metrology was newly established with the Humboldt-Universität zu Berlin. Meanwhile, at the FBH four employees and Ph.D. students are already involved in this field.

Fortunately, our electronic and optical components and modules based on III-V semiconductors were highly demanded as key enablers addressing the needs of today's society in fields like communications, energy, health and mobility. Like in the past years, the spectrum of our research activities has ranged from basic research, such as hybrid vapor phase epitaxy for the development of freestanding gallium nitride substrates to the development of specific small-scale series. Within strategic partnerships we increasingly manage to realize unique devices and modules for novel applications in research and industry as for example pump lasers for laser ignition in gas engines and highly compact hybrid diode lasers for Raman scat-

ting einzigartiger Bauelemente und Module für neuartige Anwendungen in Forschung und Industrie, beispielsweise Pumplaser für die Laserzündung im Automobil oder sehr kompakte hybride Diodenlaser für die Ramanstreuung im blauen Spektralbereich. Erstmals konnten wir selbstsperrende Galliumnitrid-Transistoren mit Durchbruchspannungen von mehreren hundert Volt demonstrieren. Damit ist uns ein wichtiger Schritt im Hinblick auf die Entwicklung einer Leistungselektronik in Galliumnitridtechnologie gelungen.

Ich danke allen Beteiligten, die direkt oder mittelbar Anteil an den Ergebnissen des Ferdinand-Braun-Instituts haben. Gemeinsam mit unseren Partnern aus Forschung und Industrie haben wir eine Vielfalt von Forschungsthemen bearbeitet und neue, spannende Projekte auf den Weg gebracht. Unseren Zuwendungsgebern, dem Land Berlin und dem Bund, danken wir für die großzügige Förderung sowie die Tarifangleichung Ost an West, wodurch die Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nun angemessen entlohnt werden. Schließlich wäre ohne deren Know-how und Engagement unser Erfolg nicht denkbar.

Ich freue mich auf die weitere Zusammenarbeit mit Ihnen allen und wünsche Ihnen eine anregende Lektüre der Entwicklungen des vergangenen Jahres.

Ihr

Günther Tränkle

tering in the blue spectral range. We also succeeded in demonstrating normally-off gallium nitride transistors with a breakdown voltage of several hundred volts for the first time. Thus, we accomplished an important step towards the development of power electronics in gallium nitride technology.

I like to thank all people having a stake in the results of the Ferdinand-Braun-Institut. Together with our partners from research and industry we have worked on numerous research topics and initiated new, exciting projects. We thank our supporters from the State of Berlin and the German Federal Government for generous funding as well as for aligning the level of income of our co-workers to the higher western tariff level. Thus, fair and adequate wages for the performance of our staff members were finally achieved. Without their know-how and dedicated work our success would not be possible.

I am looking forward to further fruitful cooperation and wish you an inspiring reading of our last year's developments.

Yours sincerely,

Günther Tränkle

Inhaltsverzeichnis // Table of Contents

| | |
|---|---------------------------|
| 7 | PROFIL PROFILE |
|---|---------------------------|

| | |
|----|-------------------------------------|
| 19 | SCHLAGLICHTER HIGHLIGHTS |
|----|-------------------------------------|

| | |
|----|--|
| 33 | GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH |
|----|--|

| | |
|----|---|
| 35 | MIKROWELLENKOMponentEN UND -SYSTEME MICROWAVE COMPONENTS AND SYSTEMS |
| 36 | Klasse-S-Verstärkerkonzept für HF-Leistungsmodule Innovative Class-S Amplifier Concept for High-Power Modules |
| 39 | Nicht-uniforme GaN-Wanderwellenverstärker Non-Uniform GaN Traveling Wave Power Amplifiers |
| 41 | Leistungs-Schottky-Dioden für Switchmode-Verstärker Power Schottky Diodes for Switch-Mode Amplifiers |
| 43 | Innovative atmosphärische Mikrowellen-Plasmaquellen Innovative Atmospheric Microwave Plasma Sources |
| 46 | Modellierung gehäuster GaN-Leistungstransistoren Modeling of Packaged GaN-HEMT Transistors |
| 48 | Simulation und Messung von Kalibrierstrukturen für mm-Wellen Simulation and Measurement of Calibration Structures for mm-Waves |
| 50 | Umfassende Breitband-Rauschmesstechnik Universal Broadband Noise Measurement Technique |

| | |
|----|--|
| 55 | GAN-ELEKTRONIK GAN ELECTRONICS |
| 56 | Selbstsperrende GaN-Transistoren mit p-dotiertem GaN-Gate Normally-Off GaN Transistors with p-Type Doped GaN Gate |
| 59 | GaN-MISFETs als Basis für effiziente Schaltungen GaN MISFETs as Basis for Efficient Electronics |
| 61 | Schnelle GaN-Transistoren mit integrierter Schottky-Draindiode Fast GaN Transistors with Integrated Schottky Drain Diode |
| 63 | SnPb-Bump-Technologie zur Kontaktierung von elektronischen Bauelementen SnPb Bump Technology to Interconnect Electronic Devices |

| | |
|----|--|
| 69 | DIODENLASER DIODE LASERS |
| 70 | Zuverlässige 100 µm BA-Laser mit hoher Ausgangsleistung 100 µm BA Lasers with High Reliability at High Powers |
| 73 | Laterale Strahleigenschaften von BA-Lasern mit strukturierten Kontakten Lateral Beam Properties of BA Lasers with Structured Contacts |
| 75 | Hochbrillante Trapezlaser mit integriertem Bragg-Gitter Tapered Laser with Integrated Bragg Grating Featuring High Brilliance |
| 78 | Hocheffiziente Diodenlaser bei 640 nm Highly Efficient Diode Lasers at 640 nm |
| 80 | Strahlquelle mit hoher Brillanz: MOPA Beam Source with High Brilliance: MOPA |
| 82 | Kompakte Mikrosystemlichtquelle bei 488 nm Compact Microsystem Light Source at 488 nm |
| 84 | Lasermetrologie neu am FBH etabliert Laser Metrology Newly Established at FBH |

| | |
|----|--|
| 91 | GAN-OPTOELEKTRONIK GAN OPTOELECTRONICS |
| 92 | Epitaxie von InGaN-Quantenfilmen für blaue Laserdioden Epitaxy of InGaN Quantum Wells for Blue Laser Diodes |
| 94 | Leuchtdioden für den UV-A und UV-B-Spektralbereich Light Emitting Diodes for the UV-A and UV-B Spectral Range |
| 96 | Lichtemitter auf nichtpolaren Oberflächen Nonpolar Light Emitters |

| | |
|-----|---|
| 101 | MATERIALIEN UND PROZESSE MATERIALS AND PROCESSES |
| 102 | Entwicklung defektarmer Substrate mithilfe der GaN-HVPE Development of Low Defect Density Substrates by GaN HVPE |
| 104 | Herstellung von AlGaIn-Substraten mittels HVPE Development of AlGaIn Substrates by HVPE |
| 107 | Lasergestützte Erzeugung von Vias durch Siliziumcarbid Laser-assisted Processing of Vias through Silicon Carbide |

| | |
|-----|---|
| 113 | NETZWERKE NETWORKS |
| 114 | VALORES: Werte schaffen durch Forschungsverwertung VALORES: Creating Value through Valorization |
| 116 | Forschungsvernetzung mit Anwendungsnahe: Leibniz-WideBaSe-Research Application-Based Networking in Research: Leibniz-WideBaSe-Research |
| 118 | ZEMI leistet aktiven Technologietransfer in der Mikrosystemtechnik ZEMI Provides Active Technology Transfer in Microsystems Technology |
| 120 | Berufsorientierung und Vernetzung: ANH Berlin Career Guidance and Networking: ANH Berlin |
| 122 | Netzwerke AWWNET und MANO erfolgreich in der Fachkräftesicherung AWWNET und MANO Successfully Ensure Supply with Skilled Employees |



PROFIL
PROFILE

Das FBH im Profil

Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das 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. 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 für Höchstfrequenztechnik (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 multifunctional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources which 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 comprising 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

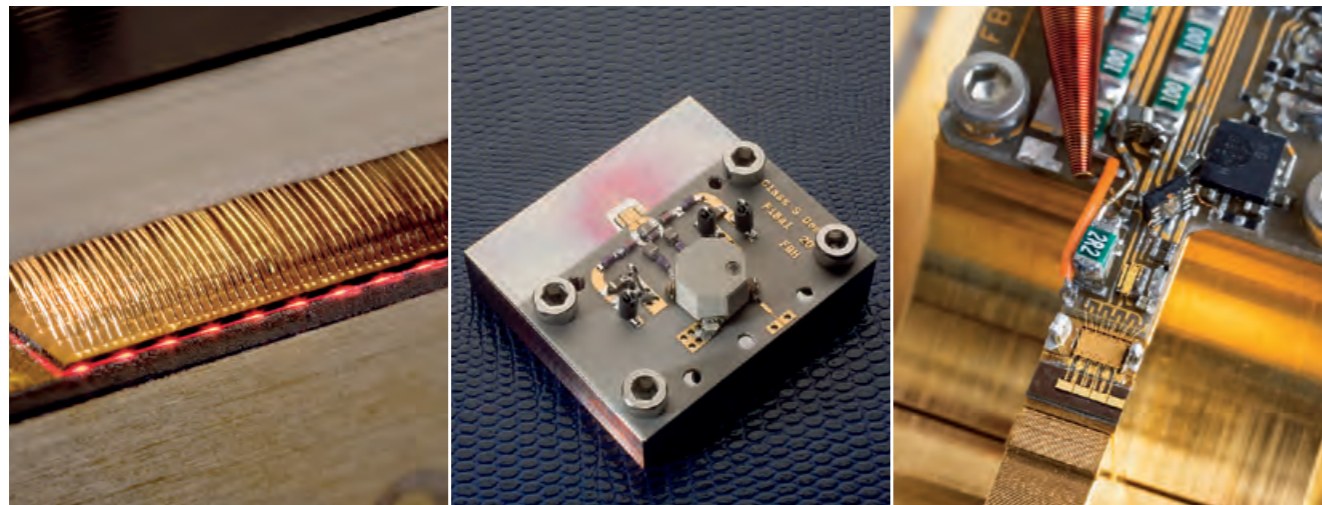
... translating ideas into innovation

- 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 Höchstfrequenztechnik. Innovative Produktideen transferieren wir erfolgreich durch Spin-offs.
- Wir offerieren hochwertige Produkte und Services, die exakt auf die Anforderungen unserer Kunden zugeschnitten sind.
- Wir bieten unseren Mitarbeitern ein stabiles 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
- Mikroplasma

GaN-Elektronik

- Mikrowellentransistoren & MMICs
- Leistungselektronik

Diodenlaser (Spektralbereich 0,6 - 1,2 µm)

- Hochleistungsdiodenlaser (Breitstreifen und Barren)
- Monolithische, hochbrillante Laser
- Hybride Lasersysteme
- Lasersensorik
- Lasermetrologie

GaN-Optoelektronik

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

Material- und Prozesstechnologie

- GaN-HVPE
- MOVPE von GaAs-basierten SESAMs für Kurzpulslaser
- Weiterentwicklung in-situ Kontrolle bei MOVPE und HVPE
- Lasermikrostrukturierung

Netzwerke

- Aus- und Weiterbildung
- Technologietransfer

Business Areas & Research

Microwave Components & Systems

- Front ends up to 100 GHz
- Power amplifiers up to 10 GHz
- Low-noise components
- Microplasmas

GaN Electronics

- Microwave transistors & MMICs
- Power electronics

Diode Lasers (spectral range 0.6 - 1.2 µm)

- High-power diode lasers (broad area lasers and bars)
- Monolithic high-brightness lasers
- Hybrid laser systems
- Laser sensors
- Laser metrology

GaN Optoelectronics

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

Materials and Process Technology

- GaN HVPE
- MOVPE of GaAs-based SESAMs for short-pulse lasers
- Improvement of in-situ control MOVPE and HVPE
- Laser micro processing

Networks

- Education & training
- Technology transfer

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

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

Hochleistungsdiodenlaser und LEDs

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

Prozesse und Materialien

- Entwicklung und Durchführung von Halbleiterprozessen (insbesondere III/V-Halbleiter)
- Epitaxie kundenspezifischer III/V-Halbleiter-Schichtstrukturen

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 arsenide and gallium nitride electronics: transistors and amplifiers (hybrid, MMIC) - design, production, small-scale series
- Microplasmas
- 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

Kontakt // Contact

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

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

Direktor Director

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

Stellvertretender Direktor Associate Director

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

Optoelektronik / Diodenlaser Optoelectronics / Diode Lasers

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

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

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

GaN-Optoelektronik GaN Optoelectronics

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

GaN-Elektronik GaN Electronics

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

Prozesstechnologie Process Technology

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

Materialtechnologie Materials Technology

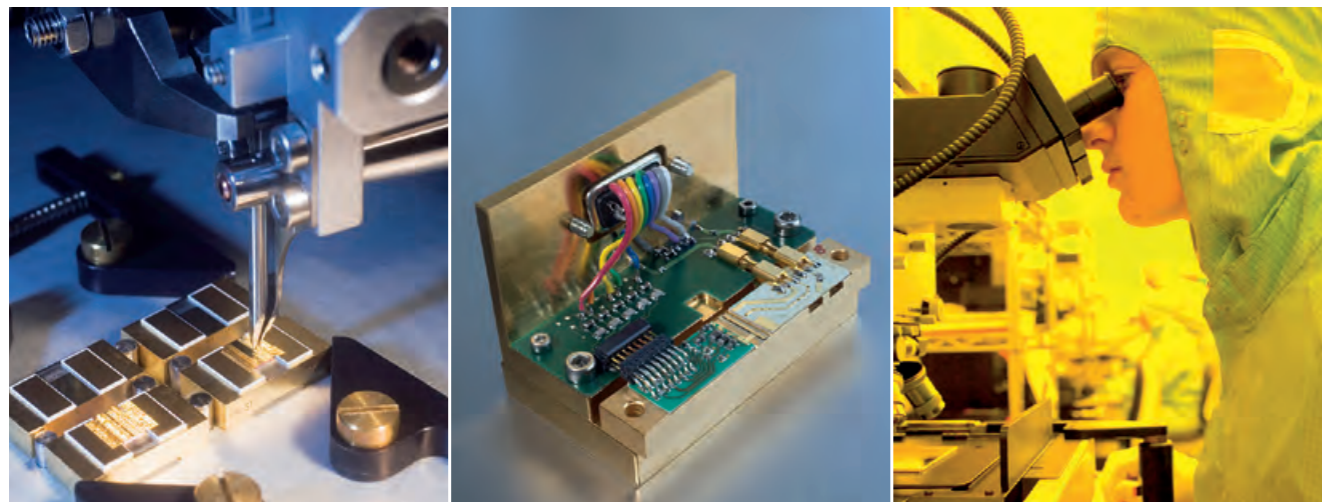
Dr. rer. nat. Markus Weyers
Phone +49.30.6392-2670
markus.weyers@fbh-berlin.de

Netzwerke Networks

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

Kommunikation & Marketing Communications & Marketing

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





Der Forschungsvorbund 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 Forschungsvorbund 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

2007

Mitarbeiter

– 210 (inklusive 95 Wissenschaftler und 25 studentische Hilfskräfte)

Umsatz

– Grundfinanzierung durch das Land Berlin und den Bund (9,0 Mio. Euro)
– Öffentliche Drittmittel (5,9 Mio. Euro)
– Industrielle Auftragsforschung (2,2 Mio. Euro)

The Institute in Figures

Founded 1992

Staff

– 210 (including 95 scientists + 25 student assistants)

Budget

– Basic funding: State of Berlin & Federal Government (9.0 Mio. Euro)
– Public project funding (5.9 Mio. Euro)
– Industrial contracts (2.2 Mio. Euro)

2008

Mitarbeiter

– 235 (inklusive 95 Wissenschaftler und 35 studentische Hilfskräfte)

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)

Staff

– 235 (including 95 scientists and 35 student assistants)

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)

Organigramm // Organizational Chart

Geschäftsbereiche // Business Areas

| | | | | | |
|--|---|--|--|--------------------------------------|------------------------------|
| Board of Trustees of Forschungsverbund Berlin e.V. Chairwoman Dr. Jutta Koch-Unterseher, SenBWF Berlin | | | | | |
| Administrative Management Dr. Falk Fabich Managing Director of FV Berlin | | Scientific Management Prof. Dr. Günther Tränkle Director of the FBH | | | |
| Business Areas | | | | | Departments |
| Microwave Components & Systems Prof. Dr.-Ing. W. Heinrich | GaN Electronics Dr.-Ing. J. Würfl | Diode Lasers Dr. G. Erbert | GaN Optoelectronics Prof. Dr. M. Kneissl | Networks N. Hübener, M.Sc. | Microwave Technology |
| Frontend | Microwave Transistors & MMICs | BA Lasers & Bars | High-Power Laser Diodes | Education & Training | Optoelectronics |
| Power Amplifiers | Power Electronics | High-Brightness Lasers | Blue & Green Laser Diodes | Technology Transfer | Materials Technology |
| Low-Noise Components | | Hybrid Laser Systems | UV LEDs | | Process Technology |
| Microplasma | | Laser Sensors | | | Central Service Units |
| Power Modules | | Laser Metrology | | | |
| University Cooperations | | | | | |
| 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) | | | | | |

Abteilungen // Departments

| | | | | | |
|--|---|---|---|---|------------------------------|
| Board of Trustees of Forschungsverbund Berlin e.V. Chairwoman Dr. Jutta Koch-Unterseher, SenBWF Berlin | | | | | |
| Scientific Management Prof. Dr. Günther Tränkle Director of the FBH | | | | Administrative Management Dr. Falk Fabich Managing Director of FV Berlin | |
| Business Areas | Departments | | | | |
| Microwave Components & Systems | Microwaves Prof. Dr.-Ing. W. Heinrich | Optoelectronics Dr. G. Erbert | Materials Technology Priv. Doz. Dr. M. Weyers | Process Technology Dr. O. Krüger | Central Service Units |
| GaN Electronics | Electromagnetic Simulation | Laser Design | Arsenides & Phosphides | Frontend | Marketing / PR |
| Diode Lasers | Circuit Design | Laser Technology | Nitrides | Backend | Quality Management |
| GaN Optoelectronics | Measurements & Packaging | Mounting & Packaging | | | Administration |
| Networks | | Laser Measurement 1 | | | IT Support |
| | | Laser Measurement 2 | | | Technical Services |
| | | | Education of Microtechnologists | | |

Wissenschaftlicher Beirat // Scientific Board

Vorsitz // Chair

Dr. Gerhard Packeiser
Infineon Technologies AG, München

Mitglieder // Members

Dipl.-Ing. Bernd Adelseck
EADS Deutschland GmbH, Ulm

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

Prof. Dr. Christian Boit
Technische Universität Berlin, Berlin

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

Dr. Hans-Jürgen Kahlert
Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH

Prof. Dr. Herbert Reichl
Fraunhofer IZM, Berlin

Dr. Uwe Strauß
OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

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

Dr. Theodor Wiesmann
Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang



SCHLAGLICHTER
HIGHLIGHTS

Anschluss an die Weltspitze: Normally-off-Transistoren für effiziente Schaltanwendungen

Seit zwei Jahren arbeitet das FBH intensiv an hocheffizienten Normally-off-Transistoren auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) bzw. Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN). Aufgrund der spezifischen Materialeigenschaften von AlGaN/GaN bieten auf diesem Materialsystem basierende Transistoren einen besonders niedrigen Einschaltwiderstand und eine sehr große Hochspannungsfestigkeit. GaN-basierte Schalttransistoren können somit silizium-basierte Bauelemente in der Leistungselektronik bezüglich ihrer Leistungsdichte, Effizienz und Schaltgeschwindigkeit überbieten. Voraussetzung für den Einsatz GaN-basierter Transistoren in der Leistungselektronik ist aus Sicherheitsgründen das Normally-off-Verhalten - der Transistor muss sperren, wenn die Kontrollelektrode spannungslos ist.

Das am FBH derzeit erfolgversprechendste und bislang am weitesten entwickelte p-GaN-Gate-Konzept bietet Vorteile wie eine hohe Schwellspannung oberhalb +1 V, niedrige Leckströme und eine hohe Durchbruchfestigkeit. Hier liegt inzwischen eine Schalttransistortechnologie vor, die ein besseres Verhältnis aus spezifischem Einschaltwiderstand und Durchbruchspannung aufweist als die etablierte Siliziumtechnologie. Es wurden mit einem spezifischen Einschaltwiderstand von $1,7 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bei einer Durchbruchspannung von 380 V Werte erreicht, mit denen der Anschluss an die Weltspitze bei selbstsperrenden GaN-Transistoren gelungen ist.

Darüber hinaus liegt mit dem Enhancement-Mode MISFET inzwischen ein Grundkonzept vor, das Schaltungen mit besonders hohen Wirkungsgraden ermöglicht. Durch den Gateisolator aus Aluminiumoxid kann der Transistor weit angesteuert werden, ohne dass über das Gate parasitäre Ströme fließen.

Catching up: Top-Level Normally-off Transistors for Efficient Switching Applications

Since two years, the FBH intensely works on highly efficient normally-off transistors based on gallium nitride (GaN) respectively aluminium gallium nitride (AlGaN). Because of the material properties of AlGaN/GaN, transistors based on this material system show an extremely low turn-on resistance combined with high-voltage capability. GaN-based switching transistors can therefore outperform silicon-based devices regarding power density, efficiency and switching speed. Due to safety reasons, a precondition for the use of GaN-based transistors in power electronics is the normally-off behavior - the transistor must close when the control electrode is unbiased.

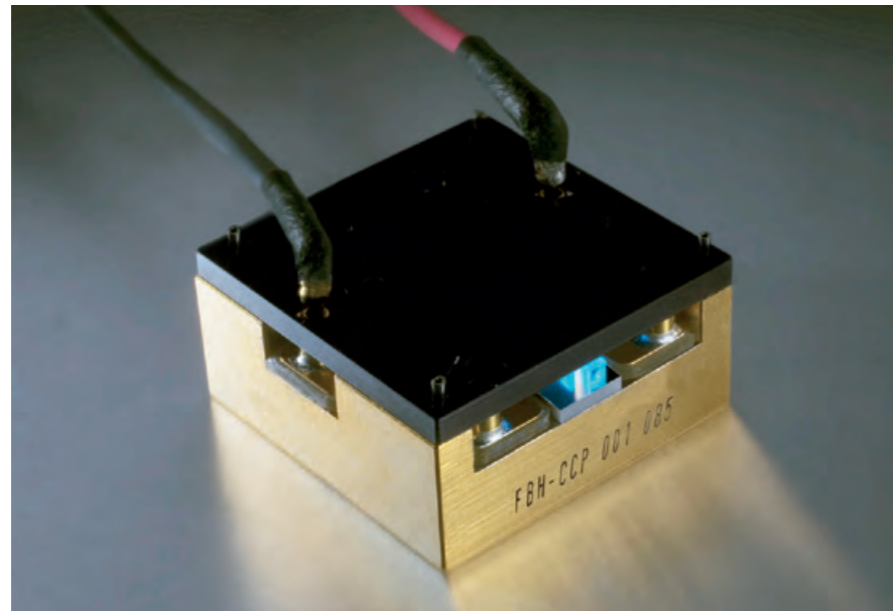
The currently most promising and up to now farthest developed p-GaN gate concept offers advantages like a high threshold voltage above +1 V, a low leakage current and a high breakdown strength. Here, a switching transistor technology has been developed, which shows a better ratio of the specific on-state resistance and breakdown strength than the established silicon technology. With the specific on-state resistance of $1.7 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ and a breakdown strength of 380 V, FBH succeeded with values which are catching up to the performance of world-leading normally-off GaN transistors.

With the enhancement mode MISFET, FBH also provides a basic concept allowing for circuits with particularly high efficiency. The transistor can be controlled by the aluminum oxide gate insulator without parasitic streams yielding over the gate.

Kompakt und effizient: Mikrosystemlichtquelle für mobile Analytiksysteme

Überschreitet die vorliegende Substanz den Grenzwert oder ist sie unbedenklich? Ist das Lebensmittel verdorben oder genießbar? Solche grundlegenden Entscheidungen sollen künftig schnell und ohne aufwändige, teure Laboranalysen vor Ort gefällt werden.

Am Ferdinand-Braun-Institut wurde eine äußerst kompakte und effiziente Mikrosystemlichtquelle entwickelt. Aufgrund ihres geringen Energieverbrauches kann sie in tragbare Messsysteme eingebaut werden und ist ideal für Vor-Ort-Untersuchungen im Bereich der Bioanalytik, der Lebensmittelüberwachung und der Medizintechnik geeignet. Die Strahlquelle sendet Licht im blauen Spektralbereich bei 488 nm aus - eine etablierte Wellenlänge für verschiedene spektroskopische Methoden, wie beispielsweise die Raman-Spektroskopie. Dabei kommt ein DFB-RW-Laser mit 976 nm zum Einsatz, dessen Strahl über Mikrooptiken in einen Kristall zur Frequenzverdoppelung geleitet wird, wobei das infrarote Licht in blaues Licht umgewandelt wird.



Klein und effizient: Laser für die in-situ Analytik.
Small and efficient: Laser for in-situ analytics.

Die FBH-Lichtquelle hat eine Grundfläche von nur 25 x 5 Millimetern und ist damit deutlich kleiner als eine Streichholzschachtel. Daher kann sie in ein Handgerät integriert werden und künftig tischgroße und damit unbewegliche Argon-Ionen-Laser, die bislang als Anregungsquelle für derartige Anwendungen genutzt werden, ersetzen. Darüber hinaus ist die Mikrosystemlichtquelle besonders energieeffizient: Mit einer optischen Ausgangsleistung von 50 Milliwatt bei einer elektrischen Gesamtleistung von unter einem Watt verbraucht sie so wenig Energie, dass ein Analytiksystem mit Akkus betrieben werden kann - eine weitere Voraussetzung für den mobilen Einsatz.

Compact and Efficient: Microsystems Light Source for Mobile Analytics

Does this substance exceed the limiting value or is it harmless? Has the food gone bad or is it eatable? In the future, such basic decisions shall be made on the spot: quickly and without complex and expensive laboratory analysis.

At the Ferdinand-Braun-Institut, an extremely compact and efficient microsystems light source has been developed. Because of its low energy consumption, it is ideally suited for in-situ investigations in bio analytics, food monitoring and medical technology. The laser source emits light in the blue spectral range at 488 nm - an established wavelength for different spectroscopic methods like Raman spectroscopy. Therefore, the beam of a DFB RW laser at 976 nm is conducted over micro optics into a crystal for frequency doubling, converting infrared light into blue light.

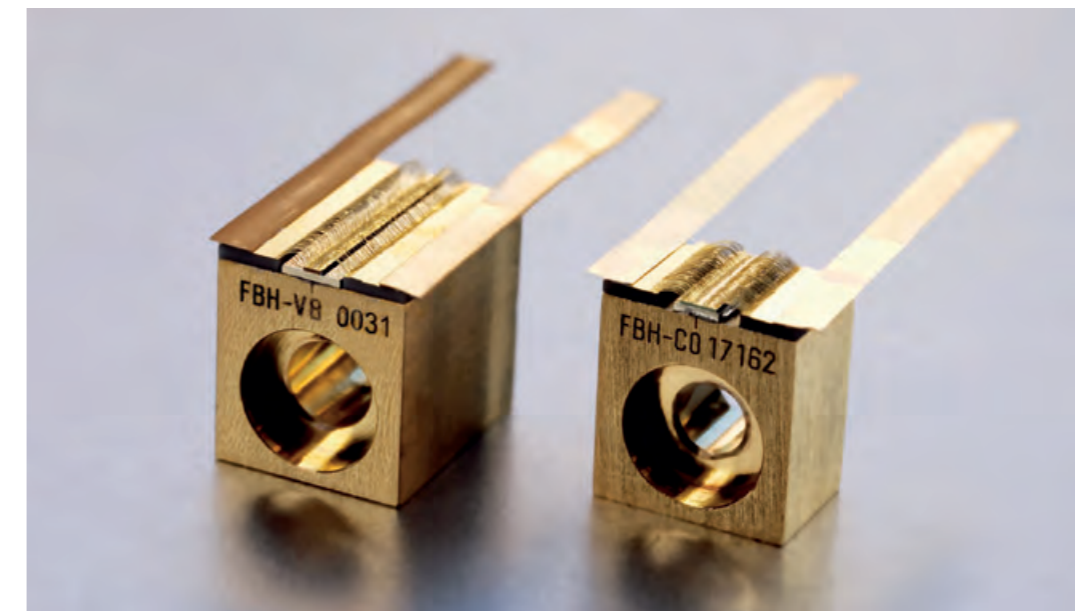
The FBH light source has a footprint of only 25 x 5 millimeters and is thus significantly smaller than a matchbox. Hence, it can be integrated into a hand-held unit and is able to replace table-sized, immobile argon ion lasers, which are presently used as pump sources for such application. In addition, the microsystems light source is particularly energy-efficient: With an optical output power of 50 milliwatt and an electric overall performance of less than one watt, it uses as little energy, that an analytics system could be driven with accumulators - another precondition for the use in mobile systems.

Neue Anwendungen erschließen: Kurzpuls-Laser mit hoher Zuverlässigkeit

Hohe Ausgangsleistungen mit hoher Zuverlässigkeit - diese Eigenschaften sind ganz besonders gefragt, wenn es um den Einsatz von Hochleistungsdiodenlasern in industriellen Anwendungen geht, beispielsweise als Pumpquellen für Gas- bzw. Festkörperlaser oder zur direkten Materialbearbeitung. In diesem Zusammenhang gewinnen Kurzpulsanwendungen - bei denen Lichtpulse in extrem kurzen Abständen ausgesendet werden - zunehmend an Bedeutung. Kurze Pulse sind die Voraussetzung für den Einsatz von Lasern bei der Fernerkundung, bei Entfernungsmessungen oder der Zündung, etwa in Automobilen.

Am FBH wurden Breitstreifenlaser bei 1100 nm entwickelt, einer etablierten Wellenlänge für derartige Anwendungen. Sie weisen neben einer hohen Ausgangsleistung und Zuverlässigkeit auch eine schmale spektrale Breite und einen geringen Abstrahlwinkel von 18° auf. Die Laser wurden mit Streifenbreiten zwischen 60 und 200 µm Breite prozessiert. Dabei erreichten die Einzelemitter mit 60 µm Streifenbreite bei einer Stromstärke von 240 A eine Ausgangsleistung von 88 Watt und Emitter mit 200 µm Streifenbreite 124 Watt.

Ihre Performance und Lebensdauer wurde untersucht, indem die FBH-Lichtquellen in kommerziellen Hochspannungs-Kurzpulsquellen bei einer Stromstärke von mehr als 200 A und Pulsen von weniger als 500 ns eingesetzt wurden. Die Laser konnten dabei ausfallfrei mit einer Spitzenleistung von mehr als 110 Megawatt pro Quadratmeter mit mehr als 30 Millionen Pulsen betrieben werden. Damit wurden am FBH Werte erreicht, die bei zugleich nachgewiesener Zuverlässigkeit bislang noch nicht publiziert wurden.



Montierter FBH-Breitstreifenlaser für den Kurzpulsbetrieb.
Mounted FBH broad area laser for short-pulse operation.

Opening up New Applications: Short-Pulse Lasers With High Reliability

High output power together with high reliability - these properties are particularly demanded when diode lasers are employed in industrial applications, for example as pump sources for gas and solid-state lasers or for direct materials processing. In this context, short-pulse applications, in which light pulses are emitted at extremely short intervals, are becoming increasingly important. Short-pulse operation enables industrial applications such as ignition, as well as diverse remote sensing, range finding and targeting applications, and these typically rely today on lamp or diode laser pumped YAG-crystals.

At the FBH, broad area lasers have been developed at 1100 nm, an established wavelength for such applications. Beside high output powers and reliability, they also provide a narrow spectral width with an extremely narrow vertical far field of 18°. The lasers were processed with stripe widths between 60 and 200 µm. On testing to a current of 240 A, single emitter 60 µm stripes achieve 88 watts without failure, and 200 µm stripes reach 124 watts.

Their performance and reliability was examined by using FBH's light sources in commercial high-voltage short-pulse sources with a current of more than 200 A and pulses of less than 500 ns. These lasers could be driven with a peak emitted optical power density of over 110 megawatts per square centimeter without failure for more than 30 million pulses. These measurements show that FBH material both delivers record peak powers and operates reliability at such powers, a combination which has not previously been published.

Strategisch vernetzt: Kooperationen mit Universitäten weiter ausgebaut

Die Kooperationen des FBH mit den Berliner Universitäten gelten als Erfolgsmodell, seitdem sie erstmalig im Jahre 2005 mit der Technischen Universität (TU) Berlin im Bereich Galliumnitrid-Optoelektronik erfolgreich umgesetzt wurden. Auch im vergangenen Jahr wurden Professoren so in Arbeitsgruppen des FBH eingebunden, dass grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung miteinander vernetzt werden. Dabei nimmt jeweils ein leitender Mitarbeiter des FBH eine wichtige Brückenfunktion zu den Professoren ein und koordiniert die reibungslose Zusammenarbeit am Institut. Das FBH sieht diese Form der Zusammenarbeit als zukunftsweisendes Modell, um durch den engen Austausch schneller Ergebnisse zu erzielen und diese in Anwendungen zu überführen.

So leitet Achim Peters, seit Oktober 2008 Professor für Optische Metrologie an der Humboldt-Universität (HU) zu Berlin, im Rahmen einer solchen Kooperation zugleich die neu eingerichtete Arbeitsgruppe Lasermetrologie am FBH. Die bereits sehr enge Zusammenarbeit mit der TU Berlin wird durch die Berufung von Wolfgang Heinrich, Leiter der Abteilung Mikrowellentechnik und des Geschäftsbereichs Mikrowellenkomponenten und -systeme am FBH, im Fachgebiet Höchsthochfrequenztechnologien weiter gestärkt. Darüber hinaus wird derzeit der Bereich Mikrowellen-Leistungsmodule, aber auch der CMOS für Schaltungen ab 60 GHz, am FBH über die Kooperation mit dem TU-Professor Georg Böck ausgebaut.

Auch überregional weitet das FBH inzwischen seine diesbezüglichen Aktivitäten aus. In Zusammenarbeit mit dem Oerlikon-Konzern, der für fünf Jahre eine Nachwuchsprofessur für Terahertz-Photonik an der Goethe-Universität Frankfurt am Main stiftet, plant das FBH diesen Bereich neu am Institut zu etablieren. Mit der Professur ist die Leitung des Teilgeschäftsbereichs Terahertz-Photonik am Ferdinand-Braun-Institut verbunden. Im Vordergrund stehen die Erforschung und Entwicklung neuer Quellen und Detektoren für Terahertzstrahlung und ihre möglichen industriellen Anwendungen. Das Berufungsverfahren startete im August 2008.

Achim Peters leitet die neue Gruppe Lasermetrologie.
Achim Peters - Head of the new Laser Metrology group.

Strategically Linked up: FBH Strengthened its Cooperations With the Universities

FBH's cooperations with the Berlin universities are considered to be a success story, since they were first introduced in 2005 with the Technische Universität (TU) Berlin in the field of gallium nitride optoelectronics. Also in the past year, professors were integrated into FBH's work groups in order to link up basic and application-oriented research. Therefore, in each of these cooperations a leading employee of the FBH is assigned to the respective professor, thus building an important bridge between the two partners and enabling the smooth workflow. The FBH sees this form of cooperation as a trendsetting model allowing to achieve results faster and to transfer them into applications.

Achim Peter, being a professor for Optical Metrology at the Humboldt-Universität (HU) zu Berlin since October 2008, is also leading FBH's Laser Metrology group within the scope of such a cooperation. With the appointment of Wolfgang Heinrich, Head of the Microwave Technology Department and the Microwave Components and Systems Business Area, on the chair for Microwave Technologies, the already very close cooperation with the TU Berlin is further strengthened. Additionally, the field of microwave power modules and CMOS for circuits > 60 GHz at the FBH will be further expanded by cooperating with the TU professor Georg Böck.

Meanwhile, these regional activities have been extended to a national level. In cooperation with the Oerlikon group, which endows a chair for five years for an up-and-coming professor for terahertz photonics at the Goethe Universität Frankfurt am Main, the FBH plans to newly establish this field at the institute. The professor to-be will also be in charge for the new Terahertz Photonics group at the Ferdinand-Braun-Institut, being responsible for research and development of new sources and detectors for terahertz radiation and possible industrial applications. The appointment procedure started in August 2008.



Höchst präzise: Neuer Bereich Lasermetrologie am FBH

Gibt es für den Menschen bewohnbare Planeten außerhalb unseres Sonnensystems? Kann man den Abstand zwischen der Sonne und der Erde auf Haaresbreite genau bestimmen? An der Beantwortung solcher Fragen beteiligt sich seit Kurzem das Ferdinand-Braun-Institut. Mit seiner 2008 etablierten Arbeitsgruppe Lasermetrologie entwickelt das FBH hochpräzise und äußerst kompakte Lasersysteme auf Halbleiterbasis, die unter anderem zur Klärung derartiger Herausforderungen benötigt werden. Langfristiges Ziel ist die mikrooptische Integration ausschließlich optischer und halbleitertechnologisch hergestellter Komponenten zu äußerst kompakten, robusten und höchststabilen Lasersystemen.

Die Arbeiten der Gruppe Lasermetrologie erfolgen in enger Kooperation mit der Arbeitsgruppe Quantenoptik und Metrologie (AG QOM) der Humboldt-Universität zu Berlin. Schnittstelle zur HU ist der ehemalige Juniorprofessor der Universität Düsseldorf Andreas Wicht, der seit Anfang September als leitender Mitarbeiter am FBH für die reibungslose Zusammenarbeit sorgt. Durch diese Kooperation können die gemeinsamen Interessen und komplementären Expertisen von FBH und AG QOM, die optische Präzisionsmessungen für fundamentalphysikalische Fragestellungen durchführt, optimal gebündelt werden. Die aus diesen Fragen resultierenden Anwendungen stellen höchste Anforderungen an Diodenlasersysteme im Hinblick auf Laserleistung, Frequenzstabilität, Strahlqualität, Kompaktheit und Systemzuverlässigkeit. Fundamentalphysikalisch orientierte Experimente profitieren von den Möglichkeiten, die sich im Rahmen der Vernetzung für die Entwicklung maßgeschneiderter Diodenlasersysteme ergeben.



Der Erdbeobachtungssatellit TerraSAR-X ist auch mit Lasern des FBH ausgestattet. Ein neuartiges Laser-Kommunikationsterminal sorgt für die blitzschnelle optische Datenübertragung.
The German radar satellite TerraSAR-X is equipped with lasers from the FBH. A novel laser communication terminal enables optical data transmission at lightning speed.

Highly Precise: New Field Laser Metrology at the FBH

Are there habitable planets beyond our solar system? Can one exactly measure the distance between the sun and the earth as precise as the width of a hair? The Ferdinand-Braun-Institut takes part in answering such questions since recently. With its 2008 established Laser Metrology group, the FBH develops the highly precise and extremely compact semiconductor laser systems, which are amongst others necessary for the clarification of such challenges. Long-term aim is to micro-optically integrate solely optical and semiconductor technology-based components into extremely compact, robust and highly stable laser systems.

The works of the Laser Metrology group are executed in close cooperation with the Quantum Optics and Metrology (AG QOM) team of the Humboldt-Universität (HU) zu Berlin. Andreas Wicht, a former junior professor from the Universität Düsseldorf and now leading employee at the FBH, is acting as an interface to the HU thus taking care for optimal communication and exchange. The common interests and complementary expertise von FBH and AG QOM, which carries out optical precision measurements on fundamental-physical questions, can be optimally bundled by this collaboration. Applications resulting from these questions make the highest demands for diode laser systems with respect to laser performance, frequency stability, beam quality, compactness and reliability of the system. Fundamental-physically oriented experiments profit from the possibilities, which arise within the scope of this networking project for the development of tailor-made diode laser systems.

Gemeinsam erfolgreich: Kooperationen mit der Industrie

FBH-Ausgründung TESAG gehört jetzt zu Jenoptik

Seit vielen Jahren betreibt das FBH aktiven Technologietransfer. Alleine fünf Spin-offs hat das Institut in den vergangenen Jahren hervorgebracht. Zum Jahresbeginn 2009 erwarb die Jenoptik-Gruppe die FBH-Ausgründung Three Five Epitaxial Services AG (TESAG). Neben der Jenoptik Diode Lab ist die TESAG bereits das zweite Unternehmen, das aus dem Know-how des FBH hervorgegangen ist und das sich mittlerweile im Besitz des Laser-Konzerns befindet. Jenoptik kann damit die komplette Technologieketten für Diodenlaser im eigenen Haus abbilden - von der Epitaxial-Waferherstellung durch den TESAG-Erwerb bis hin zu hochwertig veredelten Produkten.

BDI-Präsident Thumann zu Besuch am FBH

Die Liste der Industriekooperationen am FBH ist vielfältig und breit gefächert - sie reicht vom Start-up bis hin zu Weltkonzernen. Daher ist der Bundesverband der deutschen Industrie e.V. (BDI) ein wichtiger Ansprechpartner für das FBH. Die Spitzenorganisation der Industrieunternehmen und industrienahen Dienstleister trägt als Interessenvertretung zur Meinungsbildung und Entscheidungsfindung seiner Mitglieder bei. Im Mai 2008 besuchte der damalige BDI-Präsident und derzeitige Vizepräsident Jürgen R. Thumann das FBH. Er interessierte sich vor allem für die strategischen Industriekooperationen des FBH, insbesondere für die Zusammenarbeit mit kleinen und mittelständischen Unternehmen sowie Public Private Partnership-Modelle.



BDI-Präsident J. Thumann (Mitte) am FBH mit (von links nach rechts) M. Linscheid (HU-Vizepräsident), H. Höfer (BDI), G. Tränkle (FBH), H. Schmitz (Wista).
BDI President J. Thumann (center) at the FBH with (from left to right) M. Linscheid (HU Vice President), H. Höfer (BDI), G. Tränkle (FBH), H. Schmitz (Wista).

Jointly Successful: Cooperations With Industry

FBH's Spin-off TESAG Now Belongs to Jenoptik

FBH actively pursues technology transfer since many years, five spin-offs originated from the institute. With beginning of the year 2009, the Jenoptik group acquired Three Five Epitaxial Services AG (TESAG). After Jenoptik Diode Lab, TESAG is already the second company that has arisen from FBH's know-how and which is meanwhile owned by the laser company. With TESAG, Jenoptik possesses the complete in-house technology chain for diode lasers - from epitaxial wafer production by the TESAG acquisition to highly refined products.

BDI's President Thumann Visits the FBH

The list of FBH's cooperations with industry at the FBH is multifarious and diversified - ranging from start-ups to global corporations. Hence, the Federation of German Industry (BDI) is an important contact for the FBH. The umbrella organization of German industry and industry-related service providers contributes to opinion formation and decision making of its members. In May 2008, BDI President at that time and current Vice President Jürgen R. Thumann attended the FBH. He was especially interested in FBH's strategic cooperations with industry, particularly in the collaboration with small and medium-sized enterprises as well as public private partnership models.

Eine Woche Faszination Hochtechnologien: 3. Microsystems Summer School Berlin

Die Leistungsfähigkeit von Mikrosystemen ist hoch, die Technologieentwicklung rasant. Know-how-Vorsprung ist deshalb ein zentraler Erfolgsfaktor. Mit der dritten Microsystems Summer School präsentierte das Zentrum für Mikrosystemtechnik Berlin (ZEMI) seine regionale Kompetenz einem bundesweiten Fachpublikum zur akademischen Weiterbildung. Die Geschäftsstelle des ZEMI ist organisatorisch beim Geschäftsbereich Netzwerke des FBH angesiedelt. 22 Studierende, Diplomanden/-innen, Doktoranden/-innen sowie Mitarbeiter/-innen von Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen nutzten die Veranstaltung für Einblicke in aktuelle Forschungs- und Entwicklungsthemen der Mikrosystemtechnik (MST) in Theorie und Praxis. Vom 15. - 19. September 2008 wurden ihnen am FBH Stand und Trends von MST-Technologieentwicklungen präsentiert. Themen waren dabei u. a. die Mikroelektronik in der Medizin, die elektronische Nase und Electronic Packaging. Das FBH stellte aktuelle Forschung und Entwicklung zu hybriden Diodenlasern vor.

Highlights der Sommeruni waren Laborübungen und Führungen in den Entwicklungslaboren der ZEMI-Partnerinstitute sowie der Adlershofer Spitzentechnologie-Unternehmen AEMtec, eagleyard, FISBA OPTIK und MGB Endoskopische Geräte. Auf der bewährten Abendveranstaltung „Summer School meets Company“ stellten die Sommerstudierenden sich und ihre wissenschaftlichen Arbeiten vor und konnten Kontakte zu Vertretern regionaler Unternehmen und Forschungseinrichtungen knüpfen.

One Week of High Technology Fascination: 3. Microsystems Summer School Berlin

The capability of microsystems is high and the technology development proceeds rapidly. Therefore, advantage through know-how is a core factor for success. With the third Microsystems Summer School, the Center for Microsystems Technology Berlin (ZEMI) presented its regional competence to a nationwide professional audience for academic advanced training. The ZEMI office is organizationally located within FBH's Business Area Networks. 22 attendees, students and Ph.D. students as well as employees from companies, universities and research institutes, used the event for gaining theoretical and practical insights into current research and developments within microsystems technology (MST). From the 15th to the 19th of September, 2008 participants experienced status quo and trends in MST technology developments. Subjects were among other things, micro technology in medicine, the electronic nose and electronic packaging. The FBH introduced current research and development on hybrid diode lasers.

Highlights of the summer university were laboratory exercises and guided tours through the laboratories of the ZEMI partner institutes and the Adlershofer high-tech companies AEMtec, eagleyard, FISBA OPTICS and MGB Endoskopische Geräte. At the well-proven evening event „Summer School meets Company“, the summer students introduced themselves and their scientific works, thus making contacts with representatives of regional companies and research institutions.



Sommerstudierende besuchen MST-Unternehmen am Standort Adlershof.
Summer school students visit MST companies in Adlershof.

Gut aufgestellt: Qualität und Umwelt

Unternehmen gliedern zunehmend Forschungsleistungen aus und vergeben Aufträge an externe Partner aus der Wissenschaft. Wichtig dabei ist, dass die Maßstäbe, die für die industrielle Produktion gelten, gewährleistet sind. Dazu gehören nicht nur reproduzierbare, fähige und beherrschte Prozesse, sondern auch Termintreue und Kostenminimierung. Daher hat das FBH ein integriertes Managementsystem für „Forschung und Entwicklung von Bauelementen für Optoelektronik und Mikrowellentechnik“ erfolgreich eingeführt und ist gemäß der Normen ISO 9001 (Qualität), 14001 (Umwelt) und 18001 (Arbeitsschutz) zertifiziert. Das letzte Überwachungsaudit in allen Bereichen hat das FBH im Dezember 2008 ohne Abweichungen bestanden.

Im Bereich Umweltmanagement steht der aktive Umweltschutz, etwa durch Verzicht auf umweltschädliche Lösungsmittel im Vordergrund. Entsprechende Maßnahmen, die sich unter anderem aus den Gefährdungsanalysen ergeben, schonen nicht nur die Umwelt, sondern erhöhen auch die Sicherheit am Arbeitsplatz. Zudem sinken durch den Umstieg auf energiesparendere Modelle, beispielsweise bei Lüftermotoren oder im Bereich der Klimatechnik, die Kosten bei Energie und Wärme. Ein gut aufgestelltes Umweltmanagement verhilft zugleich zu mehr Rechtssicherheit und kann die Anforderungen der Umweltämter besser erfüllen. Maßnahmen, beispielsweise die Nutzung vorhandener Ausrüstung für das bleifreie Löten als neue, umweltfreundlichere Alternative werden derzeit erprobt.

Energiemanagerin an Bord

Im Juni 2008 hat Kristin Lorenz eine 3-monatige Weiterbildung zum EnergieManager (IHK) / European Energy Manager (CCI) erfolgreich abgeschlossen. Damit verfügt das FBH nun über eine qualifizierte Fachkraft für die Bereiche: Energiewirtschaft, Wärmetechnik, Kältetechnik, Klimatisierung, Wirtschaftlichkeit und Projektmanagement. Sie soll das FBH künftig bei allen Energieaspekten des Anlagenkaufs und Gebäudemanagements beraten.

Mehr Qualität durch interne Weiterbildung

Seit Oktober 2008 findet am FBH alle 14 Tage ein Technologieseminar statt, bei dem sich Prozessbetreuer, Technologen und Techniker abteilungsübergreifend zu technologischen Gesamtprozessen abstimmen und Erfahrungen austauschen. Damit gibt es am Institut erstmals eine interne Kommunikationsplattform für die Mitarbeiter, um Technologien vorzustellen und neue Ansätze zu diskutieren. Die Veranstaltungsreihe wird von der Abteilung Prozesstechnologie mit überaus positiver Resonanz organisiert und ist ein wichtiger Beitrag, um die Qualität der Prozesse weiter voranzubringen.

Well Placed: Quality and Environment

Companies increasingly outsource research and development services and conclude contracts to external scientific partners. Thus, it is indispensable for everyone involved in the value chain to ensure the measures applied to industrial production. This does not only affect reproducible, capable and controlled processes, but also adherence to delivery dates and cost minimization. Due to these demands, the Ferdinand-Braun-Institut has successfully introduced an integrated management system and is certificated according to the ISO standards 9001 (quality), 14001 (environment) and 18001 (occupational health and safety). The last surveillance audit in these areas has been passed by the FBH without restrictions in December 2008.

In the field of environmental management, active environment protection is of particular importance, as for example by abolishing environmentally unfriendly solvents. The corresponding measures which arise for instance from danger analyses, preserve not only the environment but also increase occupational safety. In addition, energy and heating expenses decline by replacing out-of-date equipment with more energy-efficient models, such as fan motors or in air conditioning technology. At the same time, a well-established environmental management helps maintaining legal certainty and to better fulfill requirements of the environmental agencies. Measures like unleaded soldering by using existing equipment are currently tested as an alternative with less impact on the environment.

Energy Manager on Board

In June 2008, Kristin Lorenz has successfully completed her 3-month training as an EnergieManager (IHK) / European Energy Manager (CCI). Hence, FBH disposes of a certified skilled worker for the following areas: Energy management, heat engineering, refrigeration engineering, climate control, cost-effectiveness and project management. She will advise the FBH on all energy aspects concerning equipment purchase and facility management.

Raising Quality by Internal Training

In October 2008, FBH newly established a bi-weekly technology seminar, which brings together the responsible persons for processes, technologists and technicians in order to exchange experiences and to adjust overall processes. Hence, for the first time an internal communication platform for the employees was set up to introduce technologies and to discuss new approaches. The very positively accepted series of events is organized by the Process Technology Department and is perceived as an important contribution to promote the quality of the processes.

Ausgewählt: Köpfe aus dem FBH

Günther Tränkle in acatech gewählt

Im Oktober 2008 hat die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) Günther Tränkle als neues Mitglied gewählt. acatech vertritt die Technikwissenschaften im In- und Ausland und berät Politik und Gesellschaft in technikbezogenen Zukunftsfragen. Mit seinem neuen Modell des Innovationsdialogs wird acatech künftig zweimal jährlich die Bundesregierung bei Innovations- und Technologiefragen beraten. Die Mitglieder von acatech werden aufgrund ihrer herausragenden wissenschaftlichen Leistungen und ihrer hohen Reputation in die Akademie aufgenommen. Innerhalb der acatech setzt sich Günther Tränkle dafür ein, Forschungsergebnisse schnell zu innovativen Anwendungen weiterzuentwickeln, damit aus Forschungen immer öfter Hightech-Produkte werden.

Wolfgang Heinrich und Georg Böck sind IEEE Fellows

Wolfgang Heinrich, Abteilungsleiter Mikrowellentechnik, und Georg Böck, verantwortlich für den Bereich Mikrowellen-Leistungsmodule, wurden im Januar 2009 in den illustren Kreis der IEEE Fellows aufgenommen. IEEE ist die weltweit renommierte und führende Berufsvereinigung für Ingenieure im Bereich der Elektrotechnik und verwandter Disziplinen. „Fellow“ bezeichnet die höchste Stufe der Mitgliedschaft, die nur erreicht, wer aufgrund herausragender Leistungen von ausgewählten Mitgliedern vorgeschlagen und in einem Review-Prozess ausgewählt wird. Fellows müssen mit ihren Entwicklungen einen wesentlichen Beitrag im Ingenieurwesen, in Wissenschaft und Technologie geleistet haben.



Georg Böck.

Selected: Brains From the FBH

Günther Tränkle Elected for acatech

In October 2008, the German Academy of Science and Engineering (acatech) chose Günther Tränkle as a new member. acatech represents technical sciences in Germany and abroad and advises stakeholders in politics and society on technology and innovation-related issues. With its new model of the innovation dialogue, acatech counsels the Federal Government twice a year regarding innovation and technology-related questions. The members of acatech are admitted into the organisation because of their outstanding scientific achievements and excellent reputation. Within acatech, Günther Tränkle will lobby for a quick transfer of research results into innovative applications in order to turn research more frequently into high-tech products.

Wolfgang Heinrich and Georg Böck are IEEE Fellows

In January 2009, Wolfgang Heinrich, Head of the Microwave Department, and Georg Böck, responsible for microwave power modules, were selected for the distinguished circle of the IEEE Fellows. IEEE is the world's leading and renowned professional association for engineers in the field of electrical engineering and related disciplines. „Fellow“ is the highest grade of membership only to be reached by suggestion of selected members due to outstanding results and after passing a review process. IEEE Fellows have to contribute essentially to engineering, science and technology with their research.



Wolfgang Heinrich.

Einblicke: FBH für die Öffentlichkeit

FBH als Tatort-Filmkulisse

An einem Sonntag im März 2008 verwandelte sich der Reinraum des Ferdinand-Braun-Instituts in ein Labor des fiktiven Hightech-Unternehmens Cornea AG. Im rbb-Tatort „Blinder Glaube“ geht es um einen Mord im Umfeld einer Berliner Augenklinik und um Forschungen an einem revolutionären Netzhaut-Chip, der Blinde wieder sehend machen soll. Was am Institut einen halben Drehtag lang dauerte, war im Film 20 Sekunden lang zu sehen. Die Tatort-Folge wurde im August ausgestrahlt und im März 2009 mit dem deutschen Hörfilmpreis ausgezeichnet.

Berlin im Licht - FBH beteiligt sich mit Exponat

Zum 100-jährigen Jubiläum des Märkischen Museums zeigte das Stadtmuseum Berlin vom 24. Juni 2008 bis zum 1. Februar 2009 die Sonderausstellung „Berlin im Licht“. Dabei stand das künstliche Licht als eine der wichtigsten technischen Innovationen des frühen 20. Jahrhunderts im Mittelpunkt. Im so genannten „Lichtlabor“, präsentierten Berliner Forschungs- und Technologieunternehmen Berlin als Ort permanenter lichttechnologischer Innovationen - damals wie heute. Das Ferdinand-Braun-Institut beteiligte sich mit einem interaktiven Exponat und einem Poster zur Wasserdesinfektion mit UV-Leuchtdioden.



Die Tatort-Schauspieler J. v. Dohnányi, B. Aljinovic und D. Raacke (von links nach rechts) während einer Drehpause.
Tatort actors J. v. Dohnányi, B. Aljinovic and D. Raacke (from left to right) taking a break from shooting.

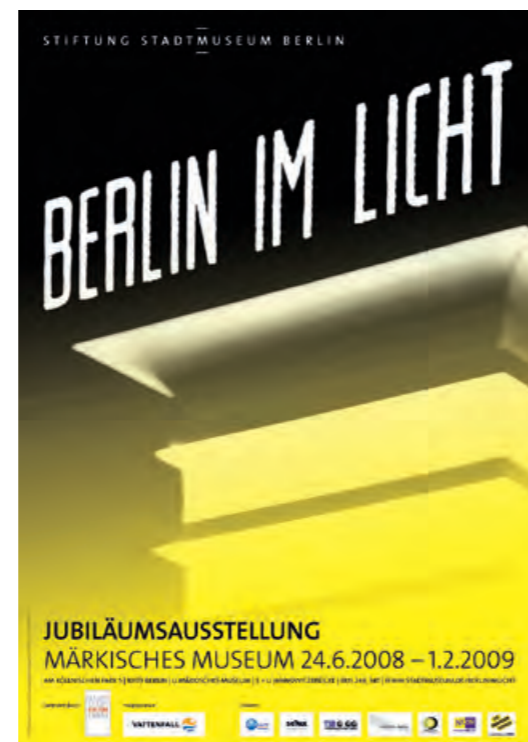
Insights: FBH for the Public

FBH Became a Tatort Film Scenery

One Sunday in March 2008, the clean room of the Ferdinand-Braun-Institute changed into a laboratory of the fictive high-tech company Cornea AG. The rbb Tatort „blind faith“ is about a murder within the sphere of a Berlin ophthalmic clinic, and about research on a revolutionary retina chip, that is supposed to make blind persons see again. What took half a day of shooting at the institute, showed up on the screen for about 20 seconds. This Tatort episode was broadcasted in August and awarded with the German „Hörfilmpreis“ in March 2009.

Berlin in Light - FBH Participated With an Exhibit

On the occasion of the 100-year celebration of „Märkisches Museum“, the Berlin Stadtmuseum displayed the special exhibition „Berlin in Light“ from June 24th, 2008 to February 1st, 2009. Artificial light took the center stage as one of the most important technical innovations of the early 20th century. In the so-called „light laboratory“, Berlin research institutes and technology companies presented their city as a place of constant light-technological innovations - as then so today. The Ferdinand-Braun-Institut took part with an interactive exhibit and a poster about water disinfection with UV light-emitting diodes.



Lange Nacht der Wissenschaften, Girls' Day, ...

Als Kuratoriumsvorsitzender der Langen Nacht der Wissenschaften war Günther Tränkle bereits im zweiten Jahr als gewählter Vertreter für die Berliner und Brandenburger Wissenschaftseinrichtungen aktiv. Neben dieser offiziellen Funktion beteiligte sich auch das Institut selbst wieder mit einem umfassenden und breit gefächerten Programm. Unter anderem war das erstmalig angebotene Laserlabyrinth eine Station der neu eingeführten Themenrouten der Wissenschaftsnacht und zog viele Interessierte an. Insgesamt konnte das FBH mit knapp 1.600 Besuchen auch im vergangenen Jahr wieder eine Steigerung der Besucherzahlen um fast 30% vermelden.

Night of Sciences, Girls' Day, ...

Like last year, Günther Tränkle as the elected chairman of the Night of Sciences since 2006, took an active part for the Berlin and Brandenburg research institutions. Beside this official function, the institute itself participated with a comprehensive and broadly diversified program. Amongst others, last year's novel laser labyrinth was a station of the newly introduced Science Night topic routes and drew many enthusiasts. In total, the number of visits at the FBH during the event boosted to 1,600 - again a record attendance with an increase of nearly 30% compared to the last year.



Spaß mit Fingerspitzengefühl: Im Laserlabyrinth wird ein Strahl durch Linsen und Spiegel geleitet.
A fun requiring sure instinct: A beam needs to be directed through lenses and mirrors in the laser labyrinth.

Auch die Nachwuchsaktivitäten, an denen sich das FBH seit Jahren regelmäßig beteiligt, kamen gut an und waren stark nachgefragt: vom Mädchenzukunftstag Girls' Day zur Berufsorientierung für Mädchen bis hin zu den Tagen der Forschung. Besonderen Zuspruch fanden die vielen praktischen Angebote, bei denen die Mädchen und Jungen selbst experimentieren und aktiv werden konnten.

Also the offspring activities, in which the FBH regularly participates since years, appealed and were strongly demanded: from the Girls' Day helping girls with their occupational orientation to the Days of Research. The youngsters were especially attracted by FBH's numerous practical offers, with which the girls and boys could experiment and become self-active.

Fit for Fun: FBH sportlich

Laufen, laufen und noch mal laufen

Bereits zum dritten Mal beteiligte sich das FBH am 5 x 5 km DKB-TEAM-Staffel-Lauf. Mehr als 2.800 Gruppen traten im vergangenen Jahr in verschiedenen Klassen an. Das FBH belegte in der Gesamtwertung einen respektablen Platz in der ersten Wertungshälfte. Im November starteten zudem zwei Teams bei der 16. Kondius Marathonstaffel. Dabei teilen sich 5 Läuferinnen oder Läufer die magischen 42,195 Kilometer in Einzelstrecken zwischen 12 und 5,195 Kilometern. Beide Teams landeten im guten Mittelfeld.

FBH-Fußballteam Vizemeister

Beim Fußball-Freundschaftsturnier der Forschungsverbund-Institute im August 2008 belegte das FBH-Team den zweiten Platz nach der Mannschaft vom Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei und vor den dritt- und viertplatzierten Mannschaften der Humboldt-Universität zu Berlin und des Leibniz-Instituts für Zoo- und Wildtierforschung. Das Turnier fand zum zweiten Mal statt und soll künftig jährlich ausgertragen werden.

Fit for Fun: Sporty FBH

Running, Over and Over Again

Already for the third time, the FBH took part in the 5 x 5 km DKB TEAM relay. Last year, more than 2,800 groups competed in different classes. The FBH team finished with a respectable place in the first half of the overall standings. In November another two teams started for the 16th Kondius marathon relay. Five runners, both male and female, shared the magic overall distance of 42,195 kilometers subdivided into single distances between 12 and 5,195 kilometers. Both teams finalized in the upper middle field.

FBH's Soccer Team is Vice Master

In the soccer tournament of the Forschungsverbund institutes in August 2008, FBH's team came in second after the team of the Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries. Third-placed and fourth-placed were the teams of the Humboldt-Universität zu Berlin and the Leibniz Institute for Zoo and Wildlife Research. The tournament was held for the second time and shall take place every year from now on.



FBH-Fußballteam 2008.
FBH soccer team 2008.

MIKROWELLENKOMPONENTEN UND -SYSTEME
MICROWAVE COMPONENTS AND SYSTEMS

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

Mikrowellenkomponenten und -systeme

Das FBH erforscht Mikrowellenbauelemente und -schaltungen und deckt dabei das komplette Spektrum ab - von Epitaxie und Prozesstechnologie bis hin zu CAD, Messtechnik und Chipaufbauten. Die Aktivitäten konzentrieren sich auf III/V-Halbleiter und die zugehörige Design- und Messtechnik-Kompetenz. Bearbeitet werden die beiden Schwerpunkte „Leistungsbaulemente für den Frequenzbereich 2 bis 10 GHz“ und „Millimeterwellen-ICs im Frequenzbereich 10 GHz bis 80 GHz“, speziell Low-Power-Frontends. Im letztgenannten Feld kommen SiGe-HBT- und RF-CMOS-Prozesse externer Foundries zum Einsatz.

Die am FBH entwickelten Bauelemente sind Schlüsselkomponenten für die drahtlose Kommunikation (Basisstationen für die Mobilkommunikation, Breitband-Richtfunk) und die Sensorik (z. B. Radarsensoren im Automobil). Ebenfalls im Portfolio ist das Thema „Mikrowellen-Plasma-Quellen“, das die Integration von Leistungs-Mikrowellenelektronik zusammen mit Strukturen zur Plasma-Anregung beinhaltet.

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 GHz bis 10 GHz und den Leistungsbereich 10 W bis 100 W sowie hohe Betriebsspannungen (bis 60 V)
- Robuste rauscharme GaN-MMIC-Verstärker
- Millimeterwellen-Frontends für 24 GHz und 77 GHz als Si-MMICs
- 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 Werkzeug zur Entwicklung von Komponenten. Eine spezialisierte Messtechnik ermöglicht die Charakterisierung der Bauelemente bis zu Frequenzen von 110 GHz.

Microwave Components and Systems

FBH researches microwave devices and circuits covering the complete spectrum from epitaxy and processing to computer-aided design, measurements, and packaging. Activities focus on III-V-based semiconductor components and the corresponding design and measurement background. The two main fields are power components for the frequency range between 2 and 10 GHz and millimeter-wave integrated circuits (10 GHz to 80 GHz), with special emphasis on low-power frontends. In this field, SiGe-HBT and RF-CMOS processes of external foundries are used.

The devices developed at the FBH represent key components for wireless communications (cellular radio base stations, broad-band radio links) and sensors (e.g. automotive radar). 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 include:

- GaN high-power transistors (HEMTs) and MMICs for 2 GHz to 10 GHz with 10 W to 100 W output power for high-voltage operation (up to 60 V bias)
- Robust low-noise GaN amplifier MMICs
- Millimeter-wave frontends for 24 GHz and 77 GHz as Si-MMICs
- 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 subject of research as well as routinely available as tools for component development. Dedicated measurement equipment allows characterization up to frequencies of 110 GHz.

Innovatives Verstärkerkonzept: Klasse-S für HF-Leistungsmodulare

Neue Mobilfunkstandards wie beispielsweise UMTS erfordern die Entwicklung neuer energieeffizienter und multifunktionaler Verstärkerarchitekturen. So wird von drahtlosen Mikrowellensystemen ein immer effizienteres Leistungsmanagement verlangt. Deren Gesamtwirkungsgrad wird entscheidend durch die Endstufen bestimmt, daher stellen die Leistungsverstärker ein Schlüsselement für das Leistungsbudget des gesamten Systems dar.

Die Forderung nach einem hohen Wirkungsgrad auch bei durchschnittlichen Leistungen unterhalb der Spitzenleistung führt zwangsläufig zu einer Weiterentwicklung in Richtung Schaltverstärker, die theoretisch bis zu 100% Wirkungsgrad erreichen können. Für solche neuen Mobilfunkanwendungen hat das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik ein innovatives Klasse-S-Verstärkerkonzept entwickelt. Es ist die Basis für hocheffiziente und multifunktionale Verstärker.

Das Prinzip ist in Abb. 1 verdeutlicht. Das Eingangssignal wird mit Hilfe eines Bandpass-DS-Modulators in ein 1-Bit-Signal umgewandelt, hier mit einer Bitrate von 1,8 Gbit/s. In der erzeugten, nicht-periodischen Bitfolge sind Amplitude und Phase des ursprünglichen Signals kodiert. Das wegen der 1-Bit-Quantisierung hohe Quantisierungsrauschen wird durch Filter im Modulator um die Nutzfrequenz herum abgesenkt. Diese Bitfolge wird dann durch den Schaltverstärker verstärkt und anschließend durch das Filter demoduliert. Als Basis für die weiteren Entwicklungen wurde das Current-mode Klasse-S-Verstärkerkonzept ausgewählt.

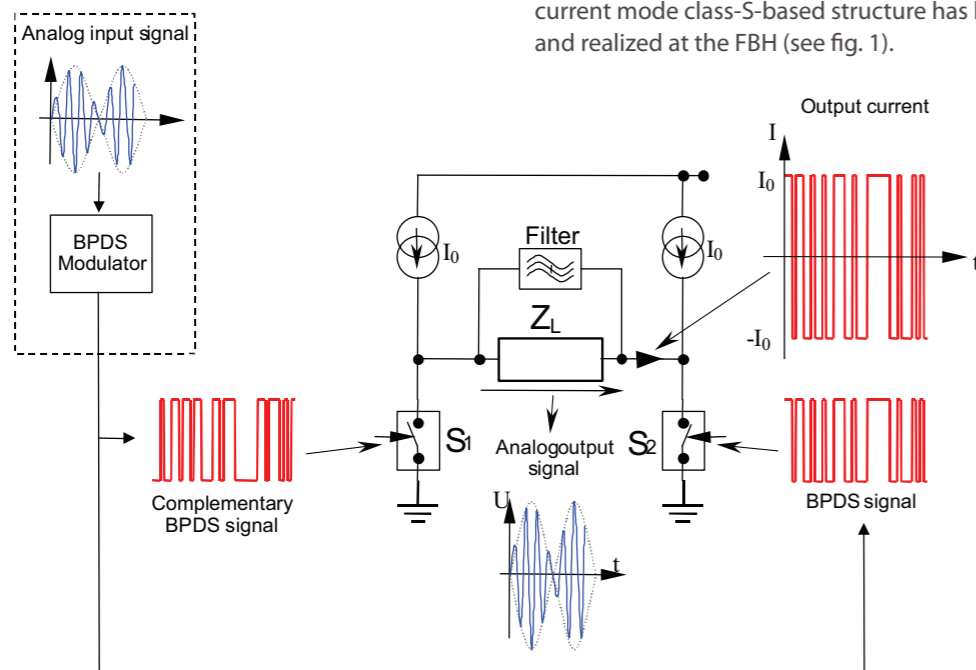


Abb. 1: Current-mode Klasse-S-Verstärker. Fig. 1: Current-mode class-S amplifier

Innovative Amplifier Concept: Class-S for High-Power Modules

New mobile communication standards such as UMTS require novel energy-efficient and multi-functional amplifier concepts. The power amplifier (PA) represents one of the most essential and, with regard to efficiency, most critical building blocks of any transceiver in wireless communications. New modulation schemes with higher peak-to-average power ratios enforce this situation.

For high-efficiency PAs, efforts are presently focusing on the switch-mode type of operation, as it allows inherently higher PAE (power added efficiency). Several types of switching-amplifier circuits have been published so far. One of the most recent switch-mode variants in the microwave frequency range is the class-S concept. Its principle is illustrated by fig. 1. It uses a Band-Pass Delta-Sigma (BPDS) bit sequence, i.e., a fully digital signal at the input of the power stage. This leads to 100% efficiency for ideal devices, because the transistors switch only between the two states "on" and "off". However, the concept needs very fast and broadband power transistors to be competitive. For such amplifiers, GaN is a particularly interesting technology because it combines high breakdown voltage with high operation speed.

In an class-S amplifier, the input signal is transformed into a bandpass-delta-sigma digital signal, in this case at 1.8 Gbit/s. This digital signal contains the amplitude and phase information of the original analog signal. Thanks to the BPDS modulation, a noise shaping around the analog signal frequency is realized, which is amplified by the power switches with high efficiencies. The analog signal is then reconstructed at the output using a bandpass filter. A current mode class-S-based structure has been designed and realized at the FBH (see fig. 1).

Der entscheidende Ansatz auf MMIC-Seite ist die Realisierung von Schaltverstärker-ICs mit höheren Ausgangsleistungen und geringerem Treiber-Energieverbrauch. Gleichzeitig wurden Arbeiten auf der hybriden Seite durchgeführt, um die entsprechenden Ergebnisse unter Klasse-S-Bedingungen zu untersuchen. Es ging um Schaltungen für eine Signalfrequenz von 450 MHz. In der Tabelle sind Messergebnisse der Effizienzen und Ausgangsleistungen für MMICs mit passivem und Gegentaktreiber zusammengefasst.

A key element for class-S amplifiers is the realization of highly efficient power switches. At the same time, the output network (reconstruction filter, balun, etc.) are important elements and have to be designed with great care in order to not degrade the efficiency of the whole amplifier. First power switches operating at 1.8 Gbit/s (suitable for analog signal frequency of 450 MHz) have been designed and fabricated. Several architectures were realized, in order to reduce the power consumption of the driver stages. Results are presented in the table below.

| Gate-width of the final-stage transistor (mm) | Driver-architecture | Output power (W) | Drain efficiency | PAE (of the complete MMIC) |
|---|---------------------|------------------|------------------|--|
| 2 | Passive load | 6.5 | 93% | 80% |
| 2 | Active load driver | 7.5 | 81% | 71% (80% final stage + active load driver) |

Effizienz und Ausgangsleistung der Endstufen für eine Bitfolge mit 1,8 Gbit/s. Efficiency and output power of the power switches at 1.8 Gbit/s.

Die realisierten MMICs wurden zu einem kompletten Verstärker nach dem Klasse-S-Prinzip vervollständigt. Abb. 2 zeigt den hybriden Aufbau dieses Klasse-S-Verstärkers. In Abb. 2 sind insbesondere die Stromzuführung und die parallelen und seriellen Resonatoren, die den Transistoren die entsprechenden Impedanzen und Transmissionsfaktoren anbieten, zu sehen.

The power switch MMICs were used to realize a complete hybrid class-S (see fig. 2). The output network contains the chokes for the current sources as well as the parallel and series resonators, which are designed to present the optimum impedances to the transistors.

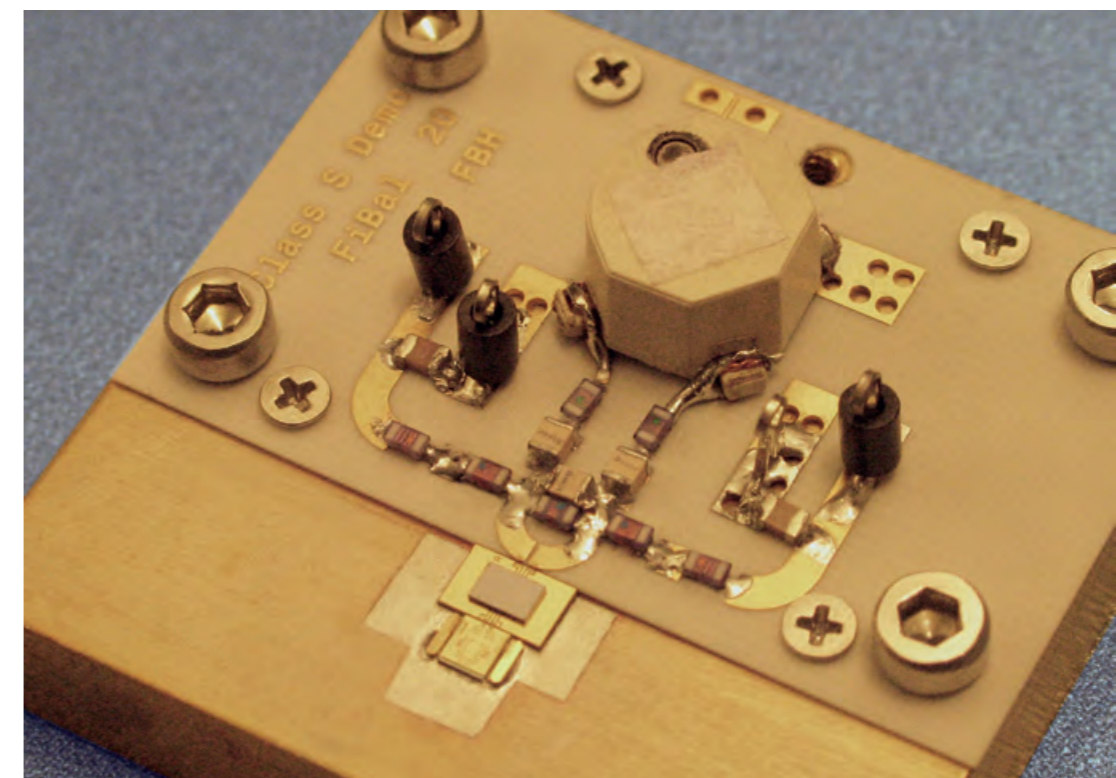


Abb. 2: Aufgebauter Current-mode Klasse-S-Verstärker. Fig. 2: Realized hybrid class-S amplifier.

Abb. 3 zeigt das gemessene Spektrum des Ausgangssignals dieser Test-Bench für ein BPDS-Signal bei einer Bitrate von 1,8 Gbit/s. Sowohl das typische BPDS-Noise-Shaping um 450 MHz herum, als auch der zweite Notch bei 1350 MHz sind gut zu erkennen.

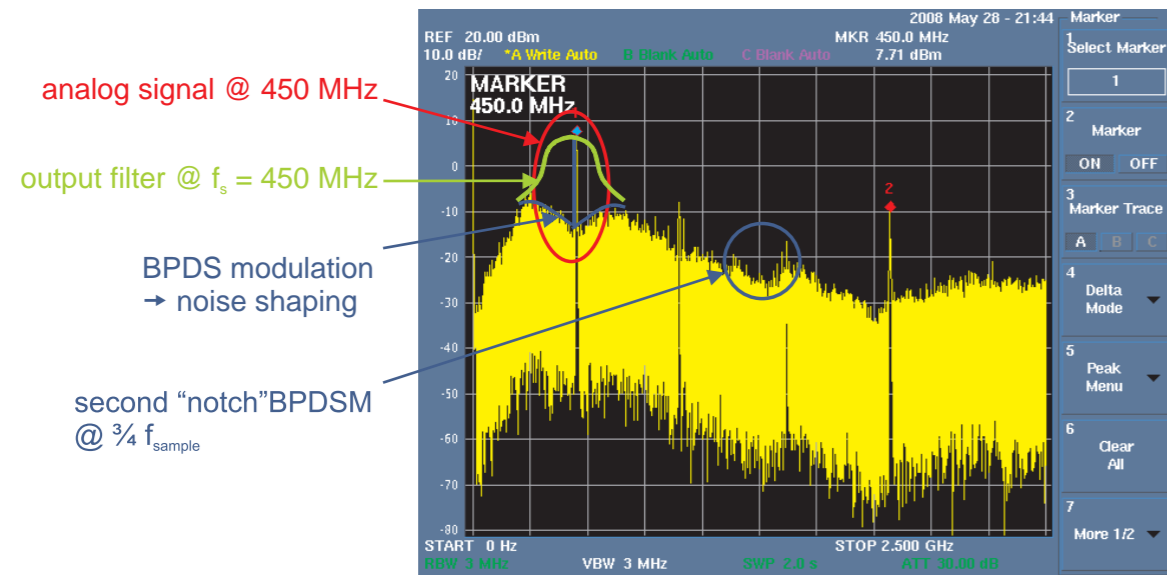


Abb. 3: Spektrum des Ausgangssignals des realisierten Klasse-S-Verstärkers bei einer Bitrate von 1,8 Gbit/s.
Fig. 3: Spectrum of the signal at the output of the class-S amplifier (BPDS-signal at 1.8 Gbit/s).

Die Ausgangsleistung bei 450 MHz beträgt ca. 2 W. Die Effizienz des gesamten Verstärkers unter diesen Messbedingungen beträgt 20%. Die hohe Verlustleistung ist zu einem großen Teil vom kommerziellen Balun verursacht, der in Messungen mehr als 3 dB Verluste aufwies. Deshalb werden zurzeit weitere Arbeiten durchgeführt, um insbesondere die Balun-Strukturen zu verbessern, was unerlässlich ist. Dessen ungeachtet sind bereits die bisherigen Messergebnisse von Frequenz und Ausgangsleistung weltweit die ersten eines Klasse-S-Verstärkers in diesem Bereich und damit im internationalen Vergleich führend.

An output power of 2 W was obtained. The efficiency of the whole amplifier under these operating conditions was around 20%. This result is still compromised by the commercial balun used, which was found to contribute in the order of 3 dB insertion loss. Further designs are currently being realized avoiding these losses. The results presented are internationally leading and pave the way for class-S at these high frequencies and power levels, and demonstrate feasibility of such a concept using GaN-HEMT power switching blocks.

Fig. 3 shows the spectrum of the output signal for a BPDS signal at 1.8 Gbit/s, which corresponds to an analog signal frequency of 450 MHz. Both the first notch at 450 MHz due to noise shaping and also the second one predicted by the BPDS theory at 1.35 GHz can be clearly seen.

Nicht-uniforme GaN-Wanderwellenverstärker für hohe Leistungen

In den meisten Mikrowellensystemen ist der Leistungsverstärker eine Schlüsselkomponente des Systems. Einschränkungen müssen dabei immer wieder in Bezug auf die erreichbare Bandbreite in Kauf genommen werden, da die erforderliche Anpassung bei klassischen Konzepten nur schmalbandig realisierbar ist. Infolge dieser Bandbreitebegrenzung sind beispielsweise gängige Basisstations-Leistungsverstärker für lediglich einen Mobilfunkstandard bzw. für nur ein Band ausgelegt. Daher sind breitbandige Leistungsverstärker in drahtlosen Kommunikationssystemen von besonderem Interesse, aber auch für weitere Anwendungen, beispielsweise in der Messtechnik, sind sie hoch attraktiv.

Eine mögliche Lösung für die Beschränkung hinsichtlich der Bandbreite ist der nicht-uniforme Wanderwellenverstärker (TWA: Travelling-Wave Amplifier). Dieser nicht-uniforme-TWA ist eine modifizierte Form des konventionellen TWAs, der auf eine maximale Ausgangsleistung hin optimiert wird. In Abb. 1 ist die grundlegendste Form des konventionellen TWAs mit beliebigen Transistorstufen A_n mit $n=1 \dots N$ dargestellt. Die einzelnen Stufen werden hierbei ein- und ausgangsseitig durch äquidistante Leitungsstücke in Kette geschaltet. So werden die parasitären Ein- und Ausgangskapazitäten der Transistoren, welche für die geringe Bandbreite von gängigen Verstärkern verantwortlich sind, in eine künstliche Leitungsstruktur integriert. Dies kommt theoretisch einer Aufhebung der Bandbreitebegrenzung gleich und ermöglicht so sehr breitbandige Verstärker.

GaN-Based Non-Uniform Traveling-Wave Power Amplifiers

In most microwave systems, power amplifiers are key components of the overall system. They are commonly narrow band because the typical specifications combine high output power with good efficiency, which inherently leads to frequency-selective concepts such as reactive matching. Hence, power amplifier structures are preferred, that are mainly designed for a single frequency. This corresponds to the typical case of high frequency terminals, where only one communication standard per front-end can be addressed. However, there are various applications such as measurement systems and multi-band components, for which broad-band power amplifiers are highly desirable, as they combine different bands (and services) in a single amplifier, thus reducing module complexity and component count.

The non-uniform traveling-wave amplifier (TWA) is an interesting solution for the bandwidth issue. According to the principle of distributed amplification, a TWA is formed by connecting amplifying cells via inductors in parallel (fig. 1). Input and output capacitances of the active devices together with inductances and connecting lines form equivalent transmission lines. In principle, the drain (output) line is terminated by a 50-Ohm load as well as the gate (input) line. Thus, the backward waves are absorbed in the 50-Ohm resistor. In non-uniform TWA variants, this dummy resistor will not be used in order to further optimize output power.

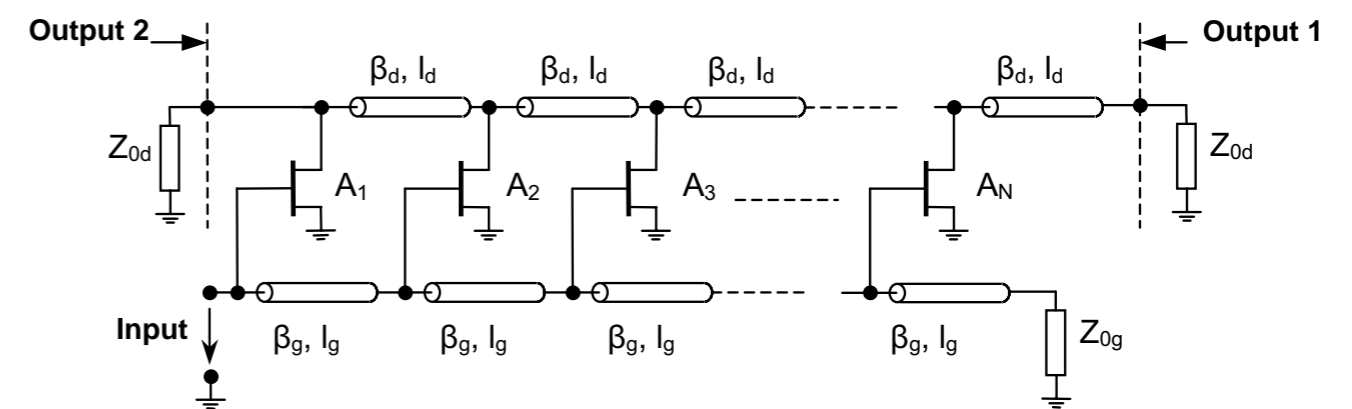


Abb. 1: Blockschaltbild eines konventionellen Wanderwellenverstärkers.
Fig. 1: Circuit diagram of a conventional travelling-wave amplifier (TWA).

Um von einem Transistor die maximal verfügbare Ausgangsleistung zu erhalten, muss der Transistor ausgangseitig mit seiner optimalen Impedanz abgeschlossen werden. Diese Terminierung kann beim konventionellen TWA aufgrund seiner intrinsischen Struktur nicht für alle Transistoren erzielt werden. Infolgedessen schöpft der TWA nur einen Bruchteil des Leistungsvermögens der Transistoren aus. Dagegen kann mit dem nicht-uniformen-TWA durch ungleichmäßige Leitungsstücke systematisch für nahezu alle Transistoren die optimale Ausgangslast erzielt werden.

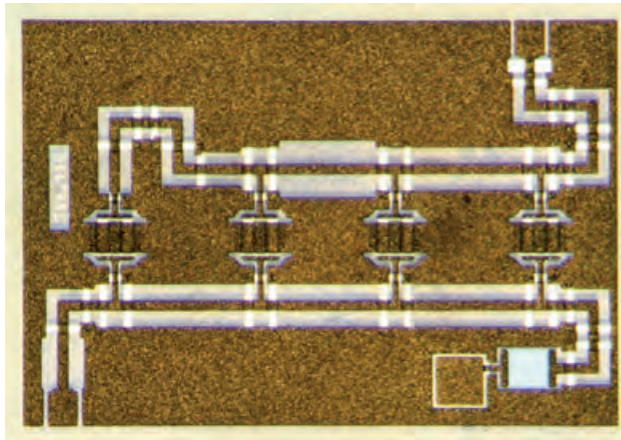


Abb. 2: GaN-MMIC mit vierstufigem nicht-uniformen-TWA.
Fig. 2: GaN non-uniform TWA with 4 stages.

Basierend auf diesem Ansatz wurde am FBH ein vierstufiger nicht-uniformer-TWA in GaN-Technologie als MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) entworfen. Abb. 2 zeigt ein Chip-Foto. Die dabei eingesetzten Transistoren, GaN-HEMTs mit $4 \times 125 \mu\text{m}$ Gateweite, liefern jeweils eine maximale Ausgangsleistung von etwa 30 dBm. Demnach wäre die maximal erreichbare Ausgangsleistung der (vierstufigen) Gesamtschaltung 36 dBm. In Abb. 3 sind die Großsignalmessergebnisse zu sehen. Der Verstärker liefert von DC bis 10 GHz nahezu eine konstante maximale Ausgangsleistung von 36 dBm. Damit erzielt das realisierte MMIC den optimalen Betriebszustand.

To present the optimum impedance to each transistor, in the non-uniform TWA the connecting lines (inductors) are varied. This allows for extracting the maximum available power out of each transistor, which is not possible for conventional TWAs and represents the main advantage of non-uniform TWAs compared to conventional ones.

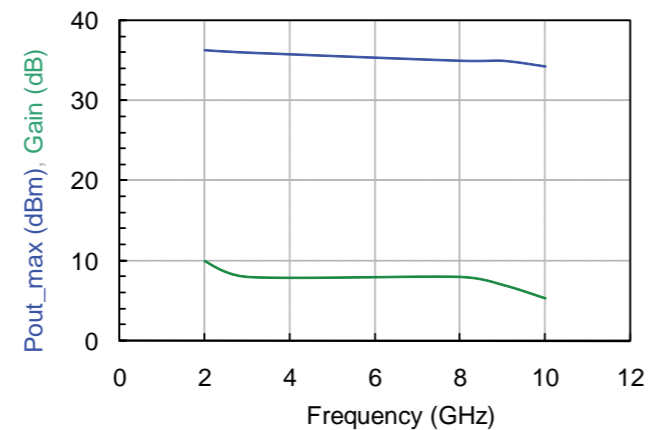


Abb. 3: Maximale Ausgangsleistung $P_{out,max}$ über der Frequenz für unterschiedliche P_{in} -Werte zusammen mit den simulierten Verläufen.
Fig. 3: Output power versus frequency for several input power levels.

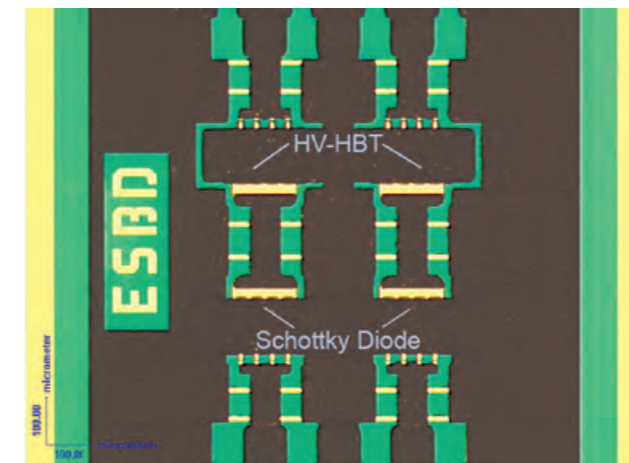
Based on this concept, a non-uniform TWA has been designed and realized at the FBH as GaN MMIC (monolithic microwave integrated circuit). Fig. 2 presents a chip photo. Transistors with $4 \times 125 \mu\text{m}$ gate width were selected. Each transistor delivers a maximum output power of 30 dBm. The complete design is a 4-cell TWA using common emitter structures. In fig. 3 large signal measurement results from 2 to 10 GHz are plotted for different input power values. The circuit delivers an output power of 36 dBm. Combining GaN HEMT technology with the traveling-wave amplifier concept allows to realize broadband amplifiers with high output power levels. This MMIC represents a useful building block for medium-power systems, measurement set-ups as well as pre-amplifiers for high-power stages. The broadband characteristics allow for operation at several bands thus reducing module chip count and packaging efforts in multi-band and reconfigurable systems.

Monolithisch integrierte, ultraschnelle Leistungs-Schottky-Dioden für Switchmode-Verstärker

Am FBH wurden sehr erfolgreich spezielle GaAs-basierte Heterojunction-Bipolartransistoren (HBT) entwickelt, die für den Einsatz in Mikrowellenschaltungen bei höheren Betriebsspannungen („high voltage“ - HV bei 28 - 35 V) geeignet sind. Trotz der sehr komplexen Herstellung der HV-HBTs – 18 Lithografie-Schritte werden benötigt – können die Bauelemente am FBH mit sehr guter Ausbeute von über 99% stabil und reproduzierbar prozessiert werden. Die HV-HBTs wurden in neuartigen Switchmode-Verstärkerschaltungen (MMICs) eingesetzt. In diesen Schaltungen werden schnelle Leistungsdioden benötigt, um die Transistoren im Schaltbetrieb zu schützen.

Wegen der geforderten Schaltgeschwindigkeiten müssen dazu Schottky-Dioden verwendet werden. Teile der epitaktischen Schichtstruktur der HV-HBTs sind für die Herstellung derartiger Dioden geeignet. Folglich können aufbauend auf dem HBT-Prozess sowohl schnelle Schottky-Dioden separat prozessiert als auch mit den HV-HBTs monolithisch integriert werden. Als weitere wichtige Voraussetzung für die Realisierung der Leistungsdioden kann hier die für die HV-HBTs entwickelte Technologie der effizienten Wärmeabfuhr durch sog. „thermal shunts“ und Flip-Chip-Montage auf AlN- oder Diamant-Wärmesenken genutzt werden.

Die Integration der beiden Typen von Bauelementen konnte erfolgreich durchgeführt werden. Der Herstellungsprozess wurde dabei nur um einen Lithografie-Schritt erweitert und folglich in seiner Komplexität nicht wesentlich vergrößert. Abb. 1 zeigt eine Gruppe von integrierten HV-HBTs und Leistungsdioden.



Monolithically Integrated Ultra-Fast Power Schottky Diodes for Switch-Mode Amplifiers

In the past, FBH has successfully demonstrated special GaAs-based Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs) for application in microwave power amplifiers at high operating voltages of 28 - 35 V, so-called high-voltage HBTs (HV-HBTs). Despite of the relatively complex technology – 18 lithography steps are needed - a stable and reproducible MMIC fabrication process using these HV-HBTs was established at FBH, including smaller transistors for digital units with a yield higher than 99%. The circuits were applied mainly for novel switch-mode amplifiers (MMICs). In such circuits, fast power diodes are required as free-wheeling diodes for transistor protection and for similar functions.

Due to the need for fast switching speed, only Schottky-type diodes can be used. Parts of the HV-HBT epitaxial layer structure are suitable for the fabrication of such diodes. Thus, the HV-HBT technology can be used for both device types, fast Schottky diodes and HV-HBTs, which can be fabricated separately as well as monolithically integrated on the same chip. Furthermore, HV-HBT technology provides efficient heat sinking, which includes „thermal shunting“ of the devices and their flip-chip mounting on AlN or diamond submounts - an essential feature for power diodes as well.

The integration of both device types was implemented successfully. Only one additional lithography step was necessary, thus processing complexity did not increase significantly. Fig. 1 shows a group of integrated HV-HBTs and power diodes.

Abb. 1: Monolithisch integrierte HV-HBTs und Schottky-Dioden in einer Mikrowellenschaltung, vorbereitet für anschließende Flip-Chip-Montage.
Fig. 1: Integrated HV-HBTs and Schottky diodes prepared for flip-chip mounting.

Die Schottky-Dioden nutzen das Potenzial der HV-HBT-Schichtstruktur, so weisen sie auch die gleiche Spannungsfestigkeit von bis zu 80 V auf (Abb. 2). In Kooperation mit der Gruppe von Prof. Boit (TU Berlin) wurde gezeigt, dass die Schottky-Dioden in der Lage sind, hohe Ströme von mindestens 4 A bei 60 V zu schalten.

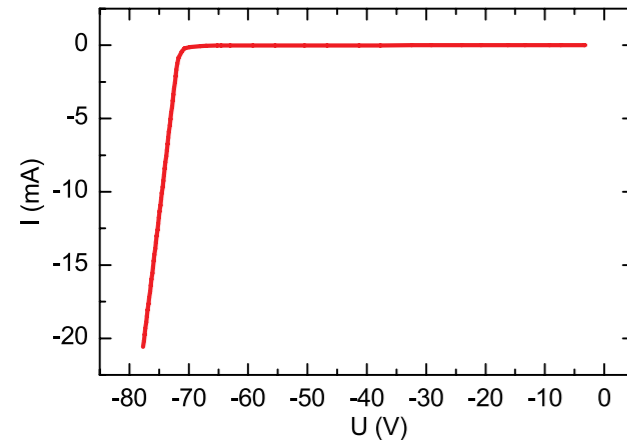


Abb. 2: Sperrkennlinie der hergestellten Leistungs-Schottky-Diode.
Fig. 2: Reverse characteristic of a fabricated power Schottky diode.

Neben den Sperrspannungs- und Maximalstrom-Werten ist die Schaltgeschwindigkeit der Dioden von entscheidender Bedeutung für ihren Einsatz bei hohen Bitraten (> 2 Gbit/s). Wie in Abb. 3 dargestellt, ist die Nachlaufzeit der Leistungs-Schottky-Dioden deutlich kürzer im Vergleich zum Schaltverhalten von pn-Dioden gleicher Größe und Bauart. Aus den in Abb. 3 dargestellten Messergebnissen im 50 Ohm-System wurden exzellente Diodenzeitkonstanten $\tau = RC$ von 9 - 12 ps ermittelt. Diese kurzen Zeitkonstanten in Kombination mit hohen Strom- und Spannungsfestigkeiten machen die entwickelten Schottky-Dioden weltweit einzigartig. Am FBH werden die Dioden, neben dem Einsatz in HV-HBT-basierten Schaltungen, in hybriden Switchmode-Verstärkern mit GaN-HEMTs genutzt.

Veröffentlichungen // Publications

P. Kurpas, B. Janke, A. Wentzel, H. Weiss, L. Schmidt, C. Rheinfelder, R. Pazirandeh, A. Maaßdorf, L. Schellhase, W. Heinrich, J. Würfl, „High Yield, Highly Scalable, High Voltage GaInP/GaAs HBT Technology“ 2008 GaAs MANTECH Technical Digest, pp. 115-118.

C. Meliani, J. Flucke, A. Wentzel, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, „Switch-Mode Amplifier ICs with over 90% Efficiency for Class-S PAs using GaAs-HBTs and GaN-HEMTs“ IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, 2008, pp. 751-754.

P. Kurpas, A. Wentzel, B. Janke, C. Meliani, W. Heinrich, J. Würfl, „Monolithically Integrated GaInP/GaAs High-Voltage HBTs and Fast Power Schottky Diodes for Switch-Mode Amplifiers“ 2009 GaAs MANTECH Technical Digest, paper 12-1.

The Schottky diodes take full advantage of the HV-HBT's layer structure reaching the same breakdown voltage of up to 80 V (see fig. 2). In cooperation with Prof. Boit's group at TU Berlin the potential of the Schottky diodes for switching high currents of more than 4 A at 60 V was demonstrated.

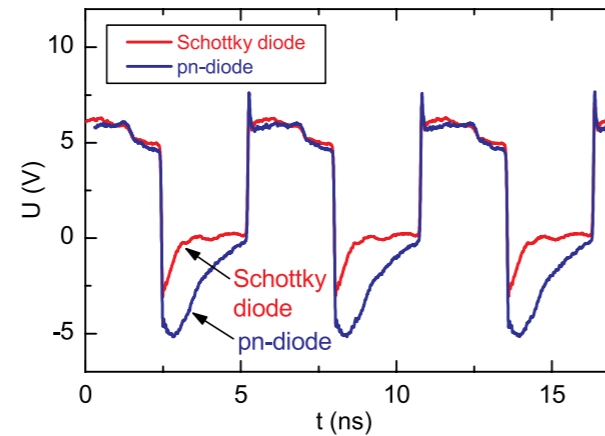


Abb.3: Schaltverhalten der Leistungs-Schottky-Diode im Vergleich zu einer pn-Diode (in 50-Ohm-Umgebung).
Fig. 3: Switching measurements of a power Schottky diode compared to a pn diode (diode as serial element in 50-Ohm environment).

Besides the blocking voltage and maximum current driving capabilities, the switching speed is of crucial importance for application at high bit rates (> 2 Gbit/s) or frequencies. Fig. 3 illustrates that the power Schottky diode exhibit a recovery time much shorter than that of a pn-junction diode of the same size and technology. Excellent time constants $\tau = RC$ of 9 - 12 ps were extracted from the results of fig. 3, which were measured in a 50-Ohm environment. The combination of such short time constants with the high current driving and breakdown voltage capabilities is world-wide unique for this class of Schottky diodes. At FBH, these diodes are used not only in HV-HBT-based circuits but also in hybrid integrated switch-mode amplifiers utilizing GaN-HEMT devices.

Von der Hautbehandlung bis zur industriellen Oberflächentechnik: Mikrowellen-Plasmaquellen bieten viele Vorteile

Als Querschnittstechnologie eröffnet die Plasmaerzeugung mit Mikrowellenfrequenzen, insbesondere im 2,45 GHz-ISM-Band, eine Vielzahl von Anwendungen. Diese Mikroplasmen sollen künftig in der Medizintechnik, beispielsweise zur Behandlung von Hauterkrankungen wie Schuppenflechte oder Neurodermitis, als Lichtquelle, in der Halbleiterfertigung und in der industriellen Oberflächentechnik zum Einsatz kommen.

Neben der etablierten Niederdruck-Plasmatechnik gewinnt der neu entstehende Bereich der atmosphärischen Mikroplasmen zunehmend an Aufmerksamkeit. Da atmosphärische Plasmen an der normalen Umgebungsluft funktionieren und keine Unterdruckkammern benötigen, sind sie vom Prinzip her flexibler einsetzbar und kostengünstiger. Mit Mikrowellenplasmen lassen sich zudem hohe Plasmadichten erzeugen und damit hohe Reaktionsraten erzielen. Die elektrischen Potentiale sind gering, wodurch die Schädigung empfindlicher elektronischer Bauteile vermieden wird. Kleine Zündspannungen erlauben die Verwendung von einfachen Niederspannungsversorgungen. Die für den Plasmabetrieb nötigen Impedanzanpassungen können durch kompakte und kostengünstige Resonatorstrukturen realisiert werden. Um diese potenziellen Vorteile nutzbar und die Technologie für neue Märkte implementierbar zu machen oder eine kostengünstige Alternative zu Niederdruckanwendungen zu schaffen, müssen jedoch noch grundlegende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geleistet werden.

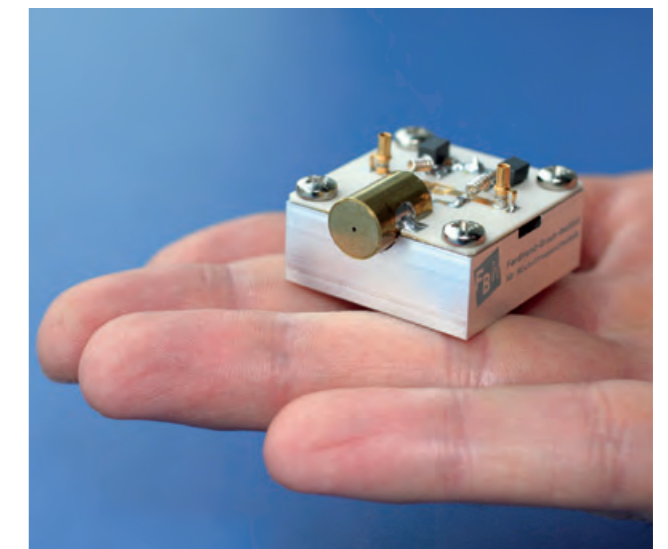
Am FBH werden dazu die notwendigen Forschungsarbeiten vorangetrieben. Entscheidend ist, dass die derzeit für die Plasmaanregung verfügbaren Magnetron-Mikrowellenquellen durch Halbleiteroszillatoren ersetzt werden. Magnetrons sind ab ca. 300 W Leistung aufwärts verfügbar, benötigen eine Hochspannungsversorgung und eine voluminöse Mikrowellenauskopplung. Für Mikroplasmen kleiner Ausdehnung, die einen kleinen Leistungsbedarf haben (1 W bis < 100 W) sind diese Versorgungen ungeeignet. Das FBH arbeitet an integrierten Quellen, bei denen ein Resonator als frequenzbestimmendes Bauelement dient und das gleichzeitig die notwendige Impedanzanpassung durchführt. Der Resonator wird durch einen Oszillator entdämpft, der auf einem GaN-Leistungstransistor des FBH basiert. Plasmaelektrode, Resonator und Oszillator werden in einer kompakten Einheit integriert und benötigen nur noch eine einfache elektrische Niederspannungsversorgung. Die Mikrowellenleistung liegt dabei typischerweise bei 30 W.

Die Herausforderungen bei der Umsetzung dieses Konzeptes liegen in den komplexen und weitgehend unerforschten elektrischen Eigenschaften des Plasmas sowie

From Skin Treatment to Industrial Surface Technology: Microwave Plasma Sources Offer Many Advantages

As a cross-sectional technology plasma generation with microwave frequencies, particularly in the 2.45 GHz ISM frequency band, opens a wide range of applications. These micro plasmas are prospectively supposed to be used in medical technology, e. g. for the treatment of skin diseases like psoriasis and neurodermatitis, as well as light sources in semiconductor industry and in industrial surface technology.

In addition to established low pressure plasma technology, the new emerging field of atmospheric micro plasmas gains increasing attention. As atmospheric plasma processes work under normal ambient conditions and do not need vacuum chambers, they are more flexible and cheaper in principle. Moreover, microwave plasmas permit generating very high plasma densities and can therewith achieve high reaction rates. Electrical potentials are low, thus damage of sensitive electrical components can be avoided. Low ignition voltages allow the use of plain low-voltage supplies. Impedance matching necessary for plasma operation can be achieved by small and cost-effective resonator structures. In order to benefit from these potential advantages by making this technology implementable for new markets and creating a competitive alternative to low pressure applications, basic research and development has to be carried out.



Integrierte Mikrowellen-Plasmaquelle.
Integrated microwave plasma source.

Due to the complex and widely unexplored electrical characteristics of the plasma as well as the impedance change between idle operation prior to plasma ignition and the

im Impedanzsprung zwischen dem Leerlaufbetrieb vor der Plasmazündung und dem eigentlichen Plasmabetrieb. Es müssen Mikrowellen-Leistungszosillatorschaltungen entwickelt werden, die im hochgradig nichtlinearen Betrieb arbeiten. Diese Probleme werden in verschiedenen Arbeitsschwerpunkten adressiert:

- Mikrowellen-Messtechnik: Aufbau eines Messplatzes zur Messung von Zündspannungen und Plasmaimpedanzen
- Feldberechnung: Elektrodynamische Feldberechnungen (3D) für die Resonatoroptimierung mit Standardsoftware (Comsol), Entwicklung von Plasmamodellen für das Comsol-Multiphysik-Modul
- Schaltungsentwurf: Verbesserung der Simulationen von Leistungszosillatoren, Optimierung der Transistormodelle, Einarbeiten der Plasma-Impedanzdaten
- Applikationen: Durchführung von Versuchen zur Anwendung in verschiedenen Technologiebereichen in enger Zusammenarbeit mit den potenziellen Kunden

In Zukunft soll die Effizienz der Oszillatoren verbessert werden. Hierzu ist geplant, Oszillatoren in Schalttechnologien (z. B. Class E) zu realisieren. Dies ist jedoch Neuland und erfordert grundlegende Untersuchungen des Gesamtsystems.

Ziel der Bestrebungen ist es, potenziellen Anwendern integrierte Mikroplasmamodule zur Verfügung zu stellen, die zuverlässig arbeiten und einfach in die Anwendungen integriert werden können. Dies erfordert eine hochgradig interdisziplinäre Arbeitsweise, da die Anwendungen in den verschiedensten industriellen und technologischen Bereichen angesiedelt sind. Dieser Bereich stellt eine interessante Anwendung und Erweiterung der FBH-Aktivitäten im Bereich der III-V-Leistungskomponenten dar. 2008 wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes die erste Plasmaquelle für biologische Untersuchungen zur Wundheilung und Hautbehandlung an die Projektpartner geliefert (Abb. 1). Eine weitere Plasmaquelle wurde für die Prozessentwicklung an einen potenziellen industriellen Anwender transferiert.



Abb. 1: Mikroplasma.
Fig. 1: Micro plasma.

plasma operation itself, makes implementing this concept a big challenge. Therefore, microwave power oscillator circuits capable of operating under highly nonlinear conditions need to be developed. These problems are addressed in several key activities:

- Microwave measurement technology: Installation and set-up of a measuring station for ignition voltages and plasma impedances
- Field calculations: Electrodynamic field simulations (3D) for optimization of resonator structures using standard software (Comsol), development of plasma models for the Comsol multiphysics module
- Circuit design: Improvement of power oscillator simulations, optimization of transistor models, implementation of plasma impedance data
- Applications: Usability testing in various technology areas in close cooperation with potential customers

In the future, performance of the oscillator circuits shall be further improved. To achieve this, it is projected to develop oscillators in switch-mode technology (e.g. class E), which additionally requires fundamental analysis of the overall system, as this concept is breaking new ground.

To provide potential users with reliable integrated microwave modules which can be easily integrated into applications is the aim of these efforts. As applications extend into various industrial and technological areas, highly interdisciplinary work is necessary. Microwave plasmas are an interesting application field for the FBH expanding the institute's activities on III-V power components. In 2008, a first plasma source was delivered to the project partners (fig. 1). An additional plasma source was transferred to a potential industrial user for further process development.



Abb. 2: Hochdruck-Plasma-Lichtquelle.
Fig. 2: High-pressure plasma light source.

Messtechnik

2008 wurde der Messplatz um einen 4-Tor-Netzwerkanalysator vom Typ Rohde & Schwarz ZVA erweitert. Dieser ermöglicht die Messung von Plasmaimpedanzen auch bei der Anregung durch eine externe Quelle. Weiterhin sind zeitlich hochaufgelöste S-Parametermessungen mit einer Bandbreite bis 30 MHz möglich. Diese Zeitauflösung ermöglicht die Untersuchung des transienten Zeitverhaltens der Plasmaimpedanz, insbesondere während der Plasmazündung. Die dynamische S-förmige Kennlinie der Spannungs-Strom-Charakteristik, die bei den bisherigen Messungen zu einer Hysterese führt, kann jetzt detailliert aufgelöst werden. Dies liefert wichtige Erkenntnisse über das dynamische elektrische Verhalten der Plasmalast bei der Zündung, die insbesondere bei der Auslegung von Leistungszosillatoren zur Plasmaversorgung von großer Bedeutung sind.

Weiterhin wurde ein optisches Spektrometer zur Untersuchung der Lichtemission von Plasmen angeschafft und in Betrieb genommen. Damit sind jetzt spektrale Untersuchungen von Lichtquellen und die Beurteilung von chemischen Zusammensetzungen in der Gasentladung möglich.

Lichtquellen

Plasmalichtquellen bieten das Potenzial, hocheffiziente und damit energiesparende Lichtquellen zu realisieren. Bislang ist es jedoch nicht gelungen, geeignete Mikrowellenversorgungen für den haushaltsüblichen Bereich kleiner Leistungen zwischen 10 W und 100 W bereitzustellen. Die beim FBH erforschten GaN-Leistungstransistoren könnten diese Lücke schließen. 2008 wurden diverse projektvorbereitende Arbeiten durchgeführt. Abb. 2 zeigt eine Hochdruck-Plasmalichtquelle, die über eine induktive Ankoppelung mit einer Mikrowellenfrequenz von 2,2 GHz versorgt wird.

Veröffentlichungen // Publications

R. Gesche, S. Kühn, C. Andrei, „Plasma ignition in a quarter-wavelength microwave slot resonator“, J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 194003 (4pp).

Measurement technology

In 2008, the measurement station was extended by a 4-port network analyzer, type Rohde & Schwarz ZVA. This analyzer allows measurement of plasma impedances with stimulus from an external source. Furthermore, S-parameter measurements can be performed with a high-time resolution of up to 30 MHz. This time resolution enables investigation of the transient plasma characteristic, particularly during plasma ignition. Dynamic S-shape of the current-voltage characteristic, leading to hysteresis behavior in the past, can now be resolved. This yields important findings on the dynamic properties of the plasma load at ignition which are important for the design of power oscillators responsible for plasma operation.

Furthermore, an optical spectrometer for the investigation of plasmas was acquired and set into operation. This equipment enables spectral investigation of light sources and evaluation of chemical compositions in the gas discharge.

Light sources

Plasma light sources have the potential to realize highly efficient and energy-saving lighting devices. Up to now, the efforts to realize suitable microwave sources in the low power region (10 W to 100 W) which are required for room lighting had not been successful. The GaN power transistors investigated at FBH might close this gap. In 2008, several corresponding project preparation activities proceeded. Fig. 2 shows a high-pressure plasma light source, supplied by a microwave frequency at 2.2 GHz using an inductive coupling structure.

Jeder Transistor ist nur so gut wie sein Modell: Beschreibung gehäuseter GaN-Leistungstransistoren

Hochleistungstransistoren in Galliumnitrid-Technologie (GaN), wie sie das FBH entwickelt, dienen zur Verstärkung von Signalen im Frequenzbereich von 2 GHz ... 10 GHz. Sie werden unter anderem in Basisstationen für zukünftige Mobilfunkgenerationen gebraucht, in denen einzelne Transistoren Ausgangsleistungen von bis zu 100 W bei 2 GHz erzeugen müssen. Für den Schaltungsentwurf wird ein genaues Modell der Transistoren benötigt, das die theoretische Analyse und Optimierung der Schaltungseigenschaften ermöglicht, und so Kosten und Entwicklungszeit deutlich reduzieren hilft.

Hochleistungstransistoren bestehen im Prinzip aus zwei Teilen: der aktive Teil des Transistors, d. h. der GaN-Halbleiterchip, ist eingebettet in ein Gehäuse. Der Halbleiterchip selbst besteht wiederum aus mehreren kleineren Einzelzellen, die im Gehäuse parallel geschaltet sind. Im Hinblick auf die Modellierung stellt nicht nur die schiere Größe des Transistors eine Herausforderung dar. Vielmehr hat auch das Gehäuse, in das die Transistorchips montiert werden, einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des gesamten Transistors. Eine entsprechend große Bedeutung kommt daher der Modellierung des passiven Gehäuses zu.

Abb. 1 zeigt einen im Gehäuse montierten 11 x 8 x 250 µm HEMT (High Electron Mobility Transistor) in GaN-Technologie. Ein Leistungstransistor dieser Bauart liefert Ausgangsleistungen von bis zu 60 W bei 2 GHz. Die Gehäusestruktur wird mit einem elektromagnetischen 3D-Simulator berechnet. Abb. 2 zeigt die simulierte Struktur, die den gehäuseten Transistor in einer Microstrip-Messumgebung nachbildet. Eine besondere Herausforderung bei der Simulation stellen die extremen geometrischen Unterschiede zwischen den dünnen Bonddrähten und der Gesamtabmessung des Gehäuses dar. Der Transistorchip ist durch einen dielektrischen Block ersetzt, und die angeschlossenen Bonddrähte werden durch interne Tore abgeschlossen. Auf diese

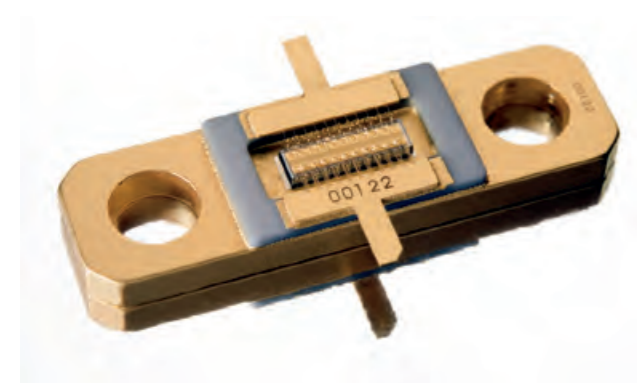


Abb. 1: Gebondeter 11 x 8 x 250 µm GaN-HEMT im Gehäuse.
Fig. 1: Packaged 11 x 8 x 250 µm GaN HEMT.

Refining High-Power Circuit Design: Modeling Packaged GaN-HEMT Transistors

The high-power transistors in gallium nitride (GaN) technology developed at the FBH target power amplifiers in the frequency range from 2 GHz ... 10 GHz. Among others they are to be deployed in base stations for next-generation wireless communications, delivering a maximum output power of up to 100 W at 2 GHz. For design of such amplifiers, an accurate model of the transistor is imperative in order to predict circuit behavior and thus reduce development cycles and time-to-market.

High-power transistors consist of two parts, the active transistor, i.e., the GaN chip, and the package into which the chip is embedded. The chip itself consists of several unit cells that are connected in parallel within the package. With respect to modeling, not only the sheer dimension of the transistor is challenging. But also the package itself, into which the chips are mounted, has a significant influence on the performance of the active device. Therefore, the accurate description of the passive package is a key step in modeling.

Fig. 1 depicts a packaged 11 x 8 x 250 µm HEMT (High Electron Mobility Transistor) in GaN technology. A transistor of this type is capable of delivering up to 60 W output power at 2 GHz. The package is a passive structure and thus can be analyzed by means of 3D electromagnetic (em) simulation. Fig. 2 illustrates the structure under consideration in a microstrip measurement environment. It showcases the simulated surface current distribution for a packaged transistor. Particularly challenging with regard to em simulation are the very different geometric dimensions involved, comparing the bondwire diameter with total package size, for instance. In em simulation, the active chip is replaced by a dielectric block, the bondwires are connected to it by so-called internal ports. In this way the electromagnetic behavior of the package can be determined, from the input and output of the package to the gate and drain ports of each individual transistor cell on the chip.

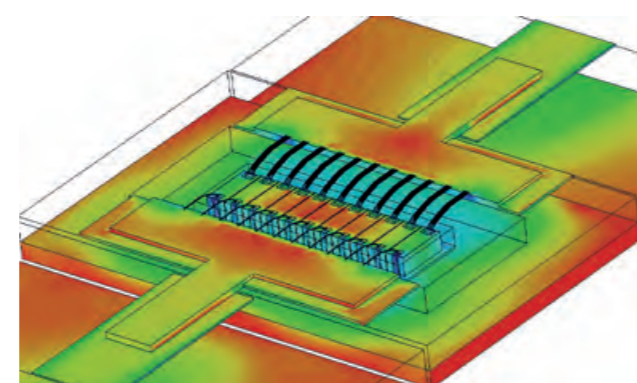


Abb. 2: Im EM-Simulator aufgebaute und berechnete Struktur mit Oberflächenstromverteilung.
Fig. 2: Structure analyzed by em simulation showing the surface current distribution.

Weise kann das elektromagnetische Verhalten des Gehäuses von der Gehäusekante bis zu Gate- und Drainanschlüssen des Transistorchips bestimmt werden.

Das der Modellierung zugrunde gelegte Ersatzschaltbild ist in Abb. 3 dargestellt. Zuleitungen und Bonddrähte werden jeweils durch Induktivitäten nachgebildet, wobei die Bonddrähte untereinander verkoppelt sind. Die Lötflächen tragen ebenfalls Induktivitäten bei, die Kapazität gegen den Gehäuseflansch wird durch die Kapazität C_g nachgebildet.

Die Ersatzschaltbildelemente werden anhand der Ergebnisse der elektromagnetischen Simulationen analytisch extrahiert. Beispielsweise wird der Induktivitätsbelag der Bonddrähte aus dem linearen Anstieg der Induktivität mit der Bonddrahtlänge bestimmt.

Abb. 4 stellt exemplarisch den Verlauf des Eingangsreflexionsfaktors S_{11} und des Ausgangsreflexionsfaktors S_{22} dar. Verglichen werden gemessene und simulierte Werte. Zur Simulation wurden die einzelnen Zellen des Transistorchips jeweils durch ein Kleinsignal-Modell beschrieben und in das soeben bestimmte Gehäusemodell eingebettet. Man erkennt die sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung im Frequenzbereich bis 6 GHz. Die obere Frequenzgrenze entspricht dem Dreifachen der Zielfrequenz von 2 GHz. Damit erfasst das Modell nicht allein die Grundwelle, sondern auch die zugehörigen höheren Harmonischen mit der erforderlichen Genauigkeit.

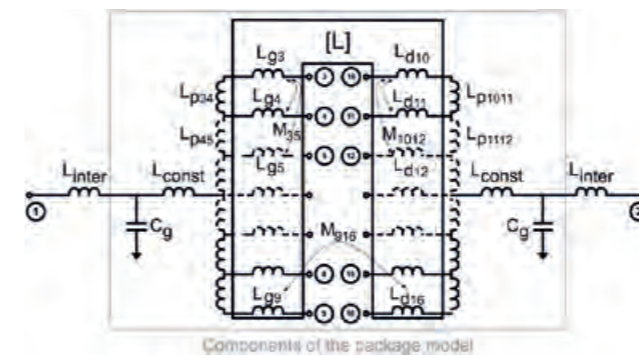


Abb. 3: Darstellung des Gehäusemodells mittels Ersatzschaltbildelementen. Die Nummerierungen stellen die Tor- bzw. Portbeschriftungen (1 - 16) des Simulators dar.
Fig. 3: Package model equivalent circuit. Numbering refers to the ports (1 - 16) used by the em simulator.

The equivalent circuit model on which the parameter extraction is based is shown in fig. 3. Transmission-line sections and bondwires are modeled by inductors, taking into account that the bondwires are mutually coupled. The T-shaped leads introduce additional inductances, the capacitance between the T-lead and the flange is modeled by the capacitor C_g .

The values of the lumped equivalent-circuit elements are extracted analytically from em simulation. As an example, the linear slope of the inductance value with respect to bondwire length is used to determine the bondwire inductance.

In fig. 4, the input reflection coefficient S_{11} and the output reflection coefficient S_{22} are plotted as a function of frequency. Measurement results are compared to simulation data using the above equivalent circuit model, where each unit cell of the power bar is replaced by a small-signal model. Excellent agreement between simulation and measurements up to 6 GHz is observed. The upper frequency limit of 6 GHz corresponds to three times the target frequency of 2 GHz. This means that the model not only covers the fundamental frequency but also describes higher harmonics with the required accuracy.

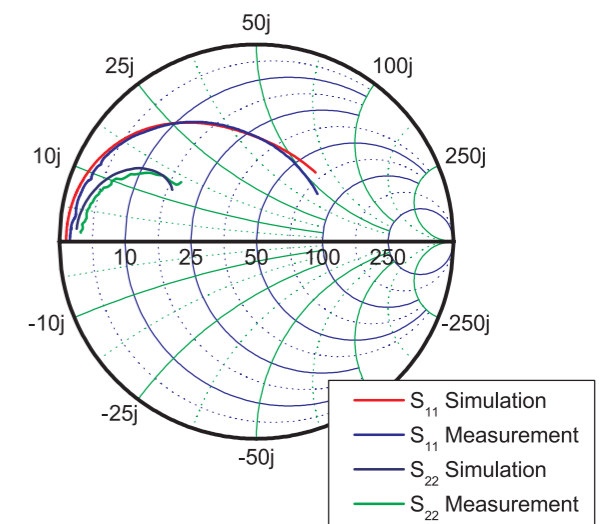


Abb. 4: Vergleich zwischen Simulation und Messung von S_{11} und S_{22} im Smith-Chart bis 6 GHz.
Fig. 4: S_{11} and S_{22} as a function of frequency up to 6 GHz: comparison between simulation and measurement data.

Eine Frage der Standards: Simulation und Messung von Kalibrierstrukturen für mm-Wellen

Bei jeder Messung spielt die Rückführbarkeit auf einen Standard eine zentrale Rolle – alle Ergebnisse müssen unter gleichen Voraussetzungen gewonnen werden. Der Bezug zu einem solchen Normal wird durch eine Kalibrierung hergestellt.

Während On-Wafer-Kalibrierungen für den Frequenzbereich bis ca. 50 GHz verlässlich entwickelt und mittlerweile routinemäßig eingesetzt werden, gibt es im Frequenzbereich darüber, d. h. von 50 GHz bis 110 GHz (W-Band) noch viele offene Fragen, obwohl diese Frequenzen mittlerweile kommerziell eingesetzt werden. Um offene Punkte bei der Kalibrierung im W-Band zu klären und Lösungen zu entwickeln, kooperiert das FBH mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und dem amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST). Erste Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Für Messungen höchster Genauigkeit wird zur Korrektur der Umgebungseinflüsse das Thru-Reflect-Line-Verfahren, kurz TRL-Verfahren, verwendet. Dazu werden unterschiedliche Strukturen eines Wellenleitungstyps (hier die Koplularleitung, engl. Coplanar Waveguide oder CPW) vermessen und aus diesen Daten mit Hilfe eines speziellen Algorithmus die Korrekturwerte ermittelt. Die Hersteller von Messnadeln bieten dafür spezielle Kalibriersubstrate (Abb. 1) an: Keramikträger mit den erwähnten unterschiedlichen Strukturen, deren Eigenschaften im Wesentlichen als bekannt angenommen werden. Damit eine Kalibrierung möglichst exakt durchgeführt werden kann, wird u. a. vorausgesetzt, dass jedes auf dem Keramikträger befindliche Testelement bei der Messung mit nur einer Mode betrieben wird und unabhängig von den anderen Strukturen auf dem Substrat reagiert. Das ist jedoch nicht immer

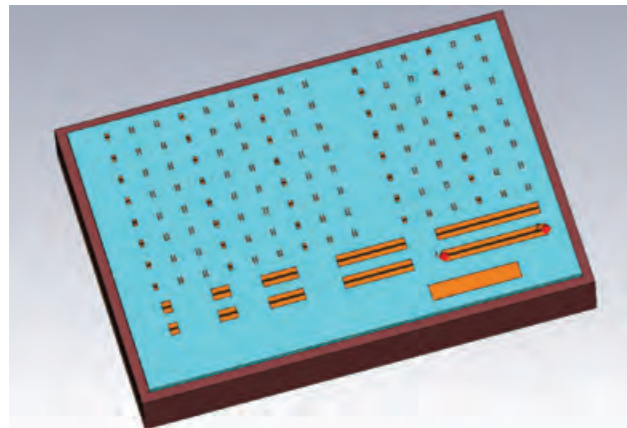


Abb. 1: Modell des Kalibrierstandards auf Absorbermaterial für die EM-Simulation (Simulationstore an der langen CPW-Leitung, rot markiert).
Fig. 1: Model for EM simulation of the calibration substrate placed on the absorbing sub-layer (simulation ports at the longest CPW; red marks).

A Question of Standards: Simulation and Measurement of Calibration Structures for mm-Waves

Traceability to a standard plays an important role in every measurement as all results must be obtained under the same conditions. The relation to such an etalon is established by calibration.

Wafer calibration standards for the frequency range up to 50 GHz are developed and routinely employed with reliable results. Although applications in the frequency range beyond 50 GHz range are already commercially available, proper measurement calibration still poses a lot of questions. In order to answer some of them and to develop solutions for the measurement process, FBH is cooperating with the German Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) and the National Institute of Standards and Technology (NIST) in the United States. In the following, first results illustrating the difficulties raised at higher frequencies are presented.

Precise measurements demand for corrections of environmental influences. The Thru-Reflect-Line (TRL) procedure is commonly accepted as the most accurate one. This procedure requires the measurement of different structures of a certain waveguide type (here the coplanar waveguide - CPW) and extracts correction terms by applying special algorithms. Usually, manufacturers of probe tips offer a calibration standard, the so-called calibration substrate (fig. 1), which consists of a ceramic substrate carrying the different CPW structures. The electrical properties for each of these CPW structures are assumed to be known such as single-mode propagation (CPW mode only) and independency of influences by neighbouring structures. This is not easily achieved as a backside metalization for instance, even if it is only the metal chuck from the measurement equipment, automatically excites the parallel-plate mode

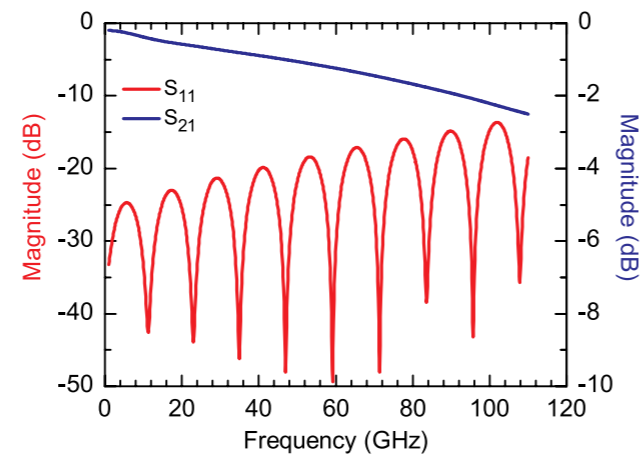


Abb. 2: Simulationsergebnis bis 110 GHz.
Fig. 2: Simulation results up to 110 GHz.

möglich, wie beispielsweise die unerwünschte Anregung der Parallelplatten-Mode (auch Mikrostreifenleitungs-Mode der CPW) zeigt. Sie tritt auf, wenn sich unterhalb des Keramikträgers Metall befindet.

Um solche Effekte aufzuzeigen und geeignete Maßnahmen zur Minimierung entwickeln zu können, wurden elektromagnetische (EM-) Simulationen durchgeführt. Aus diesen Berechnungen lassen sich verschiedene Aussagen ableiten. Zum einen kann das Übertragungsverhalten zwischen den Messnadeln in Form von Reflexions- und Transmissionsfaktoren dargestellt werden (Abb. 2), zum anderen ist die Feldverteilung in der berechneten Struktur von Interesse. Sie gibt Aufschluss darüber, wo es zu Verkopplungen der angeregten CPW-Struktur mit benachbarten Leitungselementen kommt und wie die Felder ausstrahlen. Die Abb. 3 zeigt hierzu einige Beispiele. Gewählt wurde das gleiche Kalibriersubstrat mit und ohne Absorbermaterial darunter sowie eine Anregung der langen CPW-Struktur bei 110 GHz. Es ist zu erkennen, dass Kopplung und Abstrahlung bei dem Messaufbau mit Absorbermaterial deutlich geringer sind als im Falle mit Metall direkt unter dem Keramiksubstrat.

In 2008 wurden so für verschiedene Konfigurationen die ersten Simulationen durchgeführt und Schlüsse gezogen. Weitere Untersuchungen laufen derzeit zu Problemen wie der erhöhten Dämpfung, die im oberen Frequenzbereich beobachtet wird.

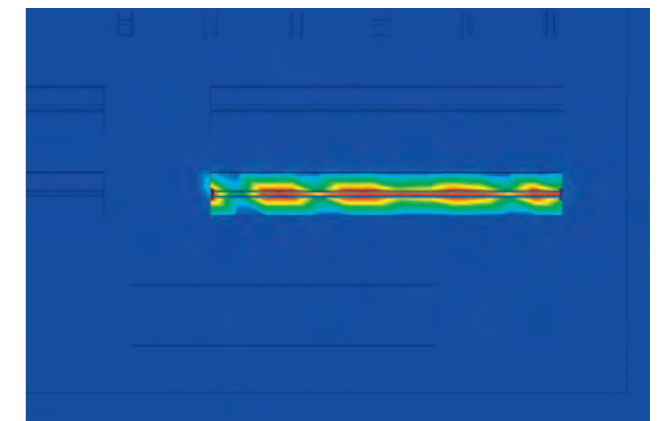
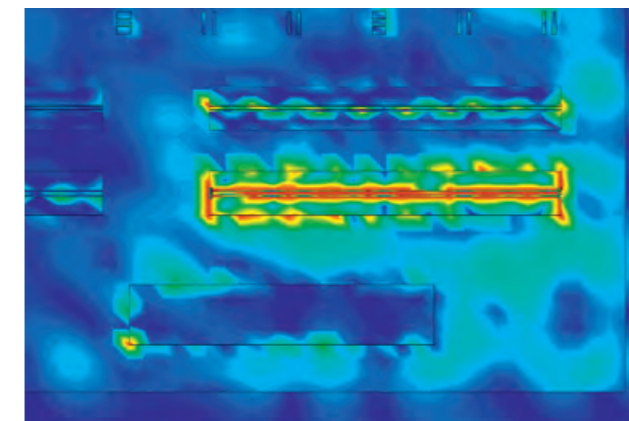


Abb. 3: Elektrische Feldverteilung in einem 250 µm dicken Kalibriersubstrat direkt auf Metallunterlage (links) und auf Absorbermaterial (rechts) bei einer Frequenz von 110 GHz.
Fig. 3: Electrical field density in a calibration substrate of 250 µm thickness placed directly on a metal chuck (left) and on absorbing material (right) at a frequency of 110 GHz.

(often also called microstrip mode of the CPW line) and transfers power with different propagation values. Thus, the total behavior deviates from the expected one.

In order to minimize such effects and to gain proper measurement procedures as well as methods and design rules for such calibration substrates, investigations of the electrical behavior are carried out using EM simulations. Their results allow for a series of conclusions. One result is the transmission and reflection behavior between the probes shown in fig. 2, another result shows the density of the electrical field (fig. 3). This is of special interest, because it reveals possible coupling effects to a neighboring element, the whole calibration substrate and the environment. Fig. 3 illustrates, how important it is whether the calibration substrate is directly placed on the metal chuck of the measurement equipment or an intermediate layer with absorbing properties is used. In this example, the longest CPW was excited at a frequency of 110 GHz. Obviously, coupling and radiation effects are less critical in the absorber case than in the metal chuck case.

In 2008, first simulations have been carried out for different configurations in material properties, excitations and intermediate layers and some conclusions could be drawn. As certain effects, e.g. the attenuation within higher frequency ranges, are still not explained, further investigations are in progress.

Besser messen: Umfassende Breitband-Rauschmesstechnik am FBH

Ein 2008 in Betrieb genommenes Gerätesystem des FBH zur Messung des Zweitör rauschens ermöglicht die vollständige Rauschcharakterisierung von Einzeltransistoren und Verstärkerschaltungen im Frequenzbereich von 0,5 bis 34 GHz. Es ergänzt ein bereits vorhandenes 50 Ω-System (f = 0,01 - 18 GHz) für Verstärker und Mischer in Koaxialtechnik.

Die vollständige Rauschcharakterisierung umfasst die vier Größen minimale Rauschzahl F_{min} , Rauschwiderstand r_n und den komplexen Quellenreflexionsfaktor $|\Gamma_{opt}| \angle \Gamma_{opt}$. Für eine Messung wird bei einer bestimmten Frequenz der Quellenreflexionsfaktor variiert und die jeweilige Rauschzahl des Messobjektes bestimmt. Es werden mindestens 12 Messungen durchgeführt, aus denen dann nach einer Methode der kleinsten Fehlerquadrate diese vier Unbekannten berechnet werden.

Dieser Ablauf erfordert die Ausstattung des Systems mit den in Abb. 1 dargestellten Komponenten. Wesentliche Bestandteile sind zwei elektromechanische Impedanztuner der Fa. Maury für die Frequenzbereiche 0,8 - 8 GHz und 4 - 26,5 GHz, die wechselseitig eingesetzt werden. Die Maury-Software ATS steuert einerseits Kalibrierung und Einstellung der Tuner und berechnet andererseits die vier Rauschparameter aus den gemessenen Rohdaten. Die Erfahrungen am FBH zeigen, dass Tunersteuerung und Kalibrierung optimal sind und den Anforderungen über die Spezifizierung hinaus bis 34 GHz genügen. Die Auswertung der Rauschmessung kann durch eigene Berechnungen transparenter gestaltet und damit verbessert werden, da die Rohdaten zugänglich sind.

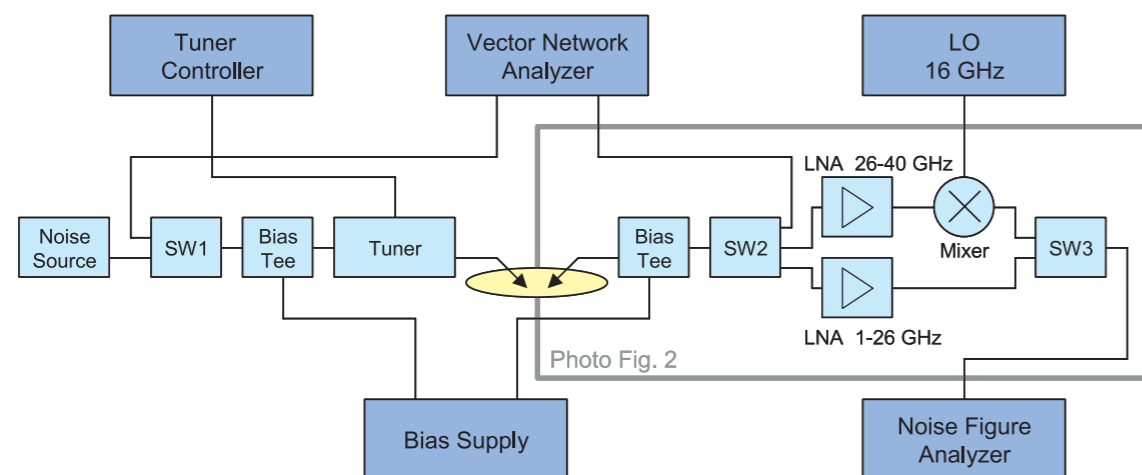


Abb. 1: Schema der On-Wafer-Rauschmessapparatur. Multi-Impedanz-Rauschquelle (links) mit Tuner und Rauschgenerator. Rauscharmer Empfänger (rechts, vgl. Abb. 2) mit der Verzweigung für die Bereiche 1 - 26 GHz und 26 - 34 GHz.
 Fig. 1: Setup of on-wafer noise measurement equipment. Multi-impedance noise source (left) with tuner and noise generator. Low-noise receiver (right, see fig. 2) with branches for the 1 - 26 GHz and 26 - 34 GHz ranges.

Improved Measuring: Universal Broadband Noise Measurement Technique at FBH

In 2008, FBH started a system for the measurement of two-port noise that enables the complete on-wafer characterization of single transistors and amplifier circuits in the frequency range from 0.5 to 34 GHz. It completes a 50-Ω system (f = 0.01 - 18 GHz) for amplifiers and mixers in coaxial technique that has already been in operation.

Full noise characterization implies the determination of four parameters: minimum noise figure F_{min} , noise resistance r_n and the complex source reflection factor $|\Gamma_{opt}| \angle \Gamma_{opt}$. A measurement at a certain frequency consists in a variation of the source reflection factor and measuring the corresponding noise figure of the device under test (DUT). After taking at least 12 measurements, these four unknowns are computed by using a least-squares fit.

This procedure requires a setup of components shown in fig. 1. Substantial elements are two, alternately used electromechanical impedance tuners from Maury Microwaves for the frequency ranges 0.8 - 8 GHz and 4 - 26 GHz. On the one hand, the Maury software ATS controls calibration and setting of the tuners, on the other, it computes the four noise parameters from the measured raw data. Experiences gained at the FBH show that tuner setting and calibration are excellent and an extension up to 34 GHz beyond the specification of 26 GHz is possible. Since raw data is accessible, the analysis of the noise measurement can be organized more transparently and thus be improved by own computations.

Erfahrungen wurden bei der Messung von GaN-Feldeffekttransistoren des FBH gewonnen. Sie eignen sich besonders für rauscharme, übersteuerungsfeste Eingangsstufen. Die Entwicklung für diese Anwendung erfordert genaue Kenntnisse der Rauscheigenschaften. Die vier Rauschparameter werden an Einzeltransistoren gewonnen und bilden die Grundlage für Modelle zum Schaltungsentwurf.

Eine Beispielmessung zeigt Abb. 3. Die Punkte sind original, ohne nachträgliche Glättung des Verlaufs. Auffällig ist die starke Streuung unterhalb 10...15 GHz. Die Messwerte sind hier infolge extremer Fehlanpassung des Objektes

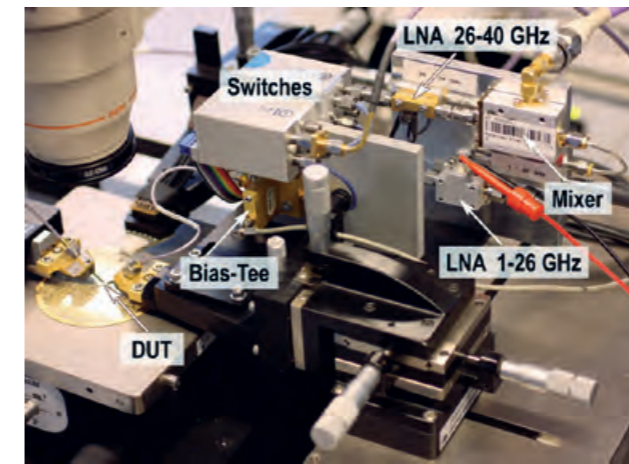


Abb. 2: Eingangsstufe des Empfängers (rechte Seite in Abb. 1).
 Fig. 2: Input stage of the receiver (right side fig.1).

($\Gamma_{in}, \Gamma_{out} \geq 1$), sehr geringer Rauschzahl ($F < 1$ dB) und hoher Verstärkung ($G > 25$ dB) sehr störanfällig. Es sind große Fehlanpassungskorrekturen erforderlich. Ebenfalls können Linearitätsprobleme auftreten. Der übliche Routinedurchlauf ist nicht geeignet. Bei ausgewählten Frequenzen muss häufig nachkalibriert und mit verschiedenen Empfindlichkeiten des Empfängers gearbeitet werden. Wegen des großen Zeitaufwandes bei der Erfassung und Nachbearbeitung der Daten ist die vollständige Rauschcharakterisierung nicht für Mapping- oder Multi-Bias-Serien geeignet. Andere Objekte, z. B. GaN-HFETs mit größerer Gateweite, HBT- oder MMIC-Verstärkerschaltungen sind nicht so störanfällig. Sie können bei geeigneter Einstellung mit dem Routineverfahren gemessen werden.

Literaturhinweis // Reference

R. Doerner, P. Heymann, „On-Wafer Noise Measurement Uncertainty“, EuMW 2007, München, Workshop WSF13.

Experience was obtained with measurements of GaN field-effect transistors manufactured at FBH. These devices are particularly suitable for low-noise input stages with high linearity and ruggedness. The design for this application requires exact knowledge of the noise characteristics. The four noise parameters are obtained from single transistors and form the basis for noise modeling used in circuit design.

An example measurement is shown in fig. 3. All points are original data without subsequent smoothing. The strong scatter below 10...15 GHz is remarkable.

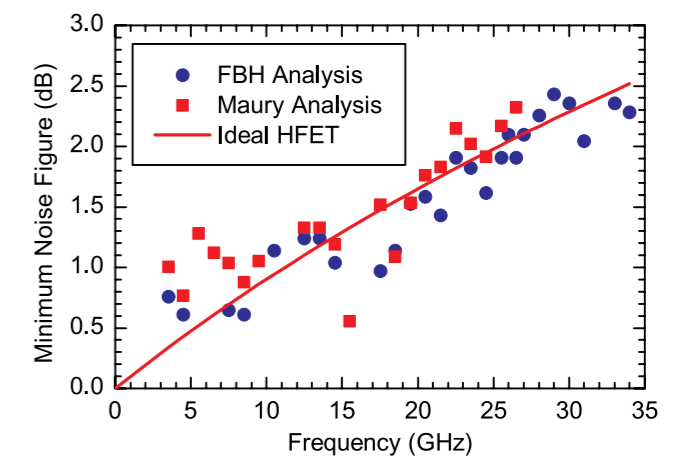


Abb. 3: Minimale Rauschzahl eines GaN-HFET 2 x 50 µm. $V_g = 15$ V; $I_d = 20$ mA. Eigene Erweiterung für f > 26 GHz.
 Fig. 3: Minimum noise figure of a GaN HFET 2 x 50 µm. $V_g = 15$ V; $I_d = 20$ mA. Own extension for f > 26 GHz.

Here, the measured values are very interference-prone due to extreme mismatching of the DUT ($\Gamma_{in}, \Gamma_{out} \geq 1$), very small noise figure ($F < 1$ dB) and high gain ($G > 25$ dB). Extensive mismatch corrections are necessary and linearity problems can occur. The usual routine run is not suitable. At selected frequencies frequent re-calibration is required and the receiver linearity must be tested carefully. Because of the large expenditure of time during the collection and analysis of the data, the complete noise characterization is not suitable for wafer mapping or multi-bias series. Other objects, e.g. GaN HFETs with larger gate width, HBT or MMIC amplifier circuits, are less sensitive to inaccuracies. They can be routinely measured with suitable adjustment of the system.

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

GaN-Elektronik

Der Geschäftsbereich GaN-Elektronik entwickelt und fertigt GaN-basierte Mikrowellen-Leistungsbaulemente und Hochleistungs-Schalttransistoren für Anwendungen im Bereich der Kommunikationstechnik und der hocheffizienten Leistungselektronik. Sie werden sowohl in diskreter als auch in monolithisch integrierter Bauform (MMICs) auf SiC und Saphir Substraten realisiert.

Alle Entwicklungen beruhen auf dem synergetischen Zusammenwirken von physikalischer und thermischer Bauelementsimulation, Epitaxie, Prozesstechnologie, Mikrowellendesign und -charakterisierung sowie Lebensdauerermessungen und der Analyse von potenziellen Ausfallmechanismen. Der Entwurf von Mikrowellenschaltungen sowie die Simulation von gehäusten Transistoren erfolgt in enger Abstimmung mit dem Geschäftsbereich Mikrowellenkomponenten und -systeme.

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
- Mehrstufige X-Band Leistungs-MMICs
- Robuste rauscharme Verstärker für C-, X- und Ka-Band-Anwendungen
- MMICs für Switchmode-Verstärker (Klasse S)
- Hochleistungs-Baulemente mit optimierter Linearität

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

- Schalttransistoren für hohe Betriebsspannungen (bis zu 1000 V) mit geringen Einschaltwiderständen und hoher Stromtragfähigkeit (bis zu 50 A)
- Normally-off Transistoren bis zu 1000 V - mit der Entwicklung von p-Gate GaN HEMTs und GaN MISFETs wurden hier neue Wege beschritten
- Entwicklung einer Lötbumptechnik für die Flip-Chip Montage von Leistungs-Schalttransistoren

Zuverlässigkeitsmessungen in Verbindung mit der Analyse und Interpretation möglicher Degradationsmechanismen werden routinemäßig durchgeführt. Die Ergebnisse fließen unmittelbar in den Bauelementprozess ein und ermöglichen somit eine kontinuierliche Verbesserung der GaN-Prozesse. Die Zuverlässigkeitsmessverfahren bestehen aus on-Wafer Screening-Tests sowie thermisch aktivierten DC- und RF-Langzeittests.

Viele der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zielen auf den Transfer in eine industrielle Umgebung, daher bestehen in diesem Bereich verschiedene strategische Kooperation mit industriellen Partnern. Darüber hinaus vermarktet das Spin-off des FBH, Berlin Microwave Technologies (BeMiTec), GaN-Prototypen.

GaN Electronics

The Business Area GaN Electronics develops and fabricates GaN-based microwave power and high-power switching devices. These devices find applications in communications and highly efficient power electronics. They are realized as discrete power devices, power bar structures and MMICs on SiC and sapphire substrates.

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. Microwave circuit and package design are pursued jointly with the Business Area Microwave Components and Systems.

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
- Multistage X-band power MMICs
- Robust Low-noise amplifiers for C-, X-, and Ka-band applications
- Switch-mode amplifier MMICs (Class S)
- On-going projects additionally focus on high-power devices with engineered linearity

The activities on high-power switching focus on:

- Switching transistors for high voltages (up to 1000 V) with low on-state resistance and high current capability (50 A)
- Normally-off transistors for voltages up to 1000 V – novel approaches led here to the development of p-gate GaN-HEMTs and GaN-MISFETs
- Development of a solder bump technology for flip-chip mounting of power switching transistors

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 research and development activities within the Business Area GaN Electronics are aiming to be transferred into an industrial environment. In this field, various strategic co-operations with industrial partners have been established. Furthermore, the FBH spin-off Berlin Microwave Technologies (BeMiTec) brings GaN prototypes into the market.

Selbstsperrende GaN-Transistoren mit p-dotiertem GaN-Gate

AlGaIn/GaN-HEMTs eignen sich wegen ihres niedrigen Einschaltwiderstands und ihrer Hochspannungsfestigkeit besonders als Schalttransistoren in der Leistungselektronik. In diesen Anwendungen muss aus Sicherheitsgründen der Transistor vollständig ausgeschaltet sein wenn die Kontrollelektrode spannungslos ist. Man spricht von einem selbstsperrenden Transistor. Gewöhnliche Schottky-Gate AlGaIn/GaN-HEMTs sind bei null Volt Gatespannung immer im eingeschalteten Zustand und eine negative Gatespannung ist nötig um sie auszuschalten (selbstleitender Transistor). Gegenüber alternativen Konzepten für selbstsperrende GaN-HEMTs bietet der hier vorgestellte p-GaN Gate-Transistor Vorteile wie eine hohe (positive) Schwellspannung, niedrige Leckströme und eine hohe Durchbruchfestigkeit.

Um einen AlGaIn/GaN-HEMT in einen selbstsperrenden Transistor zu transferieren, muss unterhalb des Gates der Potentialtopf des Transistorkanals aus dem Fermi-niveau gehoben sein wenn das Gate spannungslos ist (Abb. 1). Eine Methode ist die Einführung von Akzeptoren (p-Dotierung) in den Halbleiter. Jedoch verschlechtert eine p-Dotierung von GaN dessen Elektronenbeweglichkeit deutlich, was letztendlich die Stärken des GaN-Halbleitersystems für Schalttransistoren zunichte machen würde.

Abb. 1: Simulierte Banddiagramme eines Schottky-Gate-HEMT (blau), eines p-GaN Gate-HEMT mit GaN-Puffer (grün) und eines p-GaN Gate-HEMT mit AlGaIn-Puffer (rot). Während der 2DEG-Potentialtopf des Schottky-Gate-HEMTs durch das Fermi-niveau (0 eV) taucht, bleibt für beide p-GaN Gate-HEMTs der Kanal unbesetzt. Der AlGaIn-Puffer erhöht den Abstand des Transistorkanals vom Fermi-niveau.

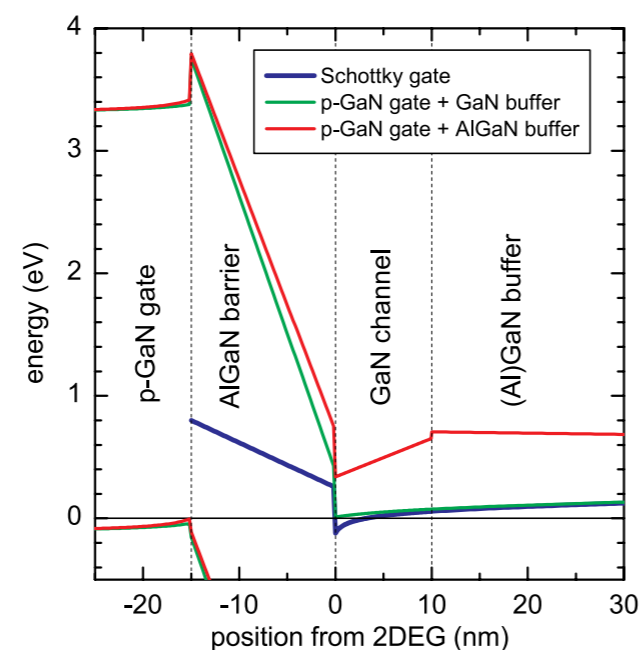
Fig. 1: Simulated band diagrams of a Schottky-gate HEMT (blue), a p-GaN gate HEMT with GaN buffer (green) and a p-GaN gate HEMT with AlGaIn buffer (red). While the 2DEG potential well of the Schottky gate HEMTs crosses the Fermi level (0 eV) the channel remains unoccupied for both p-GaN gate versions. The AlGaIn buffer increases the offset of the channel to the Fermi level.

Bei dem p-GaN Gate-Transistor werden die Akzeptoren nicht im Transistorkanal eingebaut sondern das Gate selbst – in selbstleitenden GaN-HEMTs ein Metall – wird als p-dotiertes GaN ausgeführt (Abb. 2). So bleibt einerseits (bei positiver Gatespannung) der Stromfluss im Kanal unge-stört, andererseits erhält man selbstsperrendes Verhalten.

Normally-Off GaN Transistors with p-Type Doped GaN Gate

AlGaIn/GaN HEMTs are predestinated as switching transistors in power electronics due to their low on-state resistance and their high breakdown strength. For safety reasons, transistors in power switching-applications have to be completely switched off when the control electrode is un-biased - the transistor has to be normally-off. But standard Schottky-gate AlGaIn/GaN HEMTs are always in the on-state for zero gate bias and a negative gate bias is needed to close the transistor (normally-on type). Compared to alternative concepts for normally-off GaN HEMTs, the here presented p-GaN gate transistor provides advantages such as a high (positive) threshold voltage, low leakage currents and a high breakdown strength.

To transfer an AlGaIn/GaN HEMT into a normally-off device, the potential well of the transistor channel below the gate has to be lifted above the Fermi level when the gate is un-biased (fig. 1). One way is the introduction of acceptors into the semiconductor (p-type doping). However, p-type doping significantly reduces the electron mobility in GaN, thus sacrificing one strength of the GaN material system for switching transistors.



For the p-GaN gate HEMT presented here, the acceptors are not introduced to the transistor channel, but it is the gate – a metal in standard GaN HEMTs – that consists of p-type GaN (fig. 2). This allows both, an undisturbed current flow in the transistor channel (for positive gate bias) and normally-off characteristics. Fig. 1 shows that, in contrast

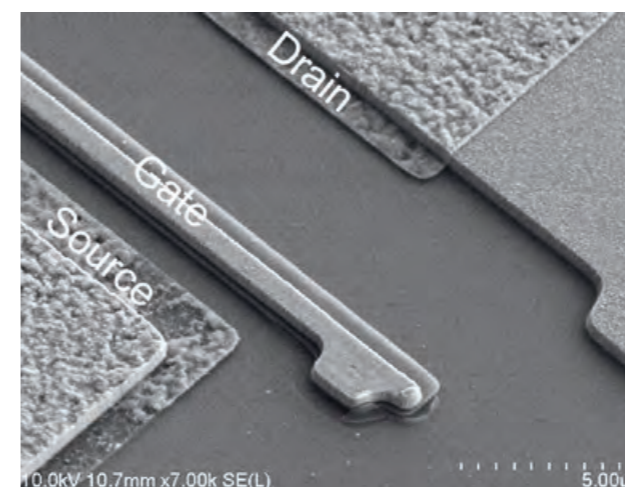


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines p-GaN Gate-HEMT. Das p-GaN-Gate hat eine zusätzliche Metallisierung.
Fig. 2: Scanning electron microscope picture of a p-GaN gate HEMT. The p-GaN gate has an additional metallization.

Abb.1 zeigt wie im Vergleich zum Schottky-Gate-HEMT (blau) das positive Potenzial des p-GaN-Gate-Leitungs-bands den Potentialtopf des zweidimensionalen Elektro-nengases (2DEG) aus dem Fermi-niveau hebt (grün).

Der Abstand des p-GaN zum 2DEG beschränkt jedoch dessen Durchgreifen auf die Potenziale am Transistorkanal. HEMTs mit einer dicken AlGaIn-Bariere und einem hohen Al-Anteil (> 18%) in der Barriere können durch das p-GaN-Gate nicht mehr in den Bereich positiver Schwellspannungen geschoben werden. Die Stromtragfähigkeit von selbstsperrenden p-GaN Gate-HEMTs war daher auf etwa 20% eines selbstleitenden Schottky-Gate-HEMTs beschränkt. Der Einsatz eines AlGaIn-Puffers unterhalb des GaN-Transistorkanals schafft Abhilfe. Die polarisierungs-induzierten Ladungen an dieser GaN/AlGaIn-Grenzschicht heben das 2DEG zusätzlich aus dem Fermi-niveau hinaus (rote Kurve in Abb. 1). Somit ist bei gleicher Stromtragfähigkeit eine positivere Schwellspannung möglich.

Abb. 3 zeigt die Transferkennlinie eines derartigen p-GaN Gate-HEMTs mit 10 µm Gate-Drain-Abstand. Die Schwellspannung ist mit +1,3 V im sicheren positiven Bereich. Bei +8 V Gatespannung ist der Transistor voll angesteuert. Der Einschaltwiderstand beträgt 14 Ωmm und als maximaler Drainstrom werden 0,4 A/mm erreicht. Trotz des weiten Aussteuerens des Gates in den positiven Spannungsbereich

to the Schottky-gate HEMT (blue), the positive potential of the p-GaN gate conduction band lifts the potential well of the two-dimensional electron gas (2DEG) out of the Fermi level (green).

However, the distance of the p-GaN to the 2DEG limits its impact on the transistor channel. HEMTs with a thick AlGaIn barrier and with a high Al content (> 18%) in the barrier cannot get shifted anymore to positive threshold voltages by the p-GaN gate. The maximum channel current of such a p-GaN gate transistor design is therefore limited to approximately 20% of a normally-on GaN HEMT. Improvement is obtained by introducing an AlGaIn buffer below the GaN channel. The polarization-induced charges at the GaN/AlGaIn interface additionally help lifting the 2DEG above the Fermi level (red curve in fig. 1).

Fig. 3 shows the transfer characteristic of such a p-GaN gate HEMT with 10 µm gate-drain distance. With a value of +1.3 V the threshold voltage is in a safe positive regime. The transistor is fully opened at +8 V gate bias. The on-state resistance is 14 Ωmm and the maximum drain current is 0.4 A/mm. Despite the wide gate swing to the positive, the gate current stays below 100 µA/mm. The pin-contact of

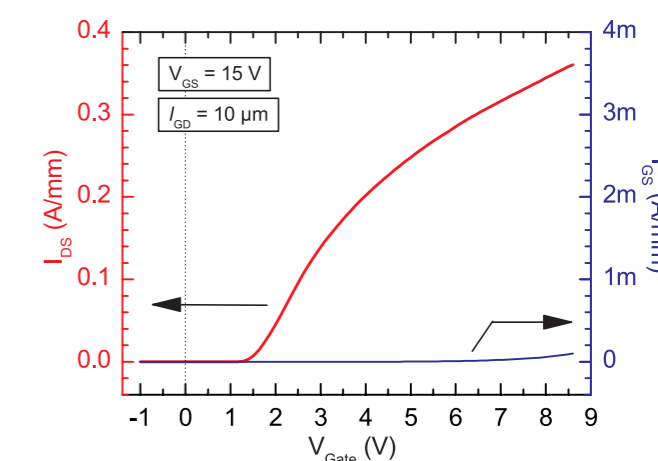


Abb. 3: Transferkennlinie (rot) und Gatestrom (blau) eines selbstsperrenden p-GaN Gate-HEMTs mit +1,3 V Schwellspannung.
Fig. 3: Transfer characteristic (red) and gate current (blue) of a normally-off p-GaN gate HEMT with +1.3 V threshold voltage.

bleiben die Gateströme unterhalb 100 $\mu\text{A}/\text{mm}$. Der pin-Kontakt des p-GaN Gates hat eine höhere Barriere als der Schottky-Kontakt eines selbstleitenden Standard-HEMTs.

Eine zusätzliche positive Eigenschaft des AlGaN-Puffers ist die Vergrößerung der pufferseitigen Barriere des Transistorkanals. So wird im gesperrten Transistor bei hohen Drain-Spannungen der Puffer-Durchbruch unterbunden und die Transistoren haben eine höhere Spannungsfestigkeit. Die Durchbruchspannung bei 0 V Gatespannung liegt für die gezeigten Transistoren bei 380 V.

Mit den beschriebenen Werten für den leitenden und den sperrenden Zustand liegt eine Schalttransistortechnologie vor, die ein besseres Verhältnis aus spezifischem Einschaltwiderstand und Durchbruchspannung aufweist als die etablierte Si-Technologie, siehe Abb. 4. Mit dieser Performance des p-GaN Gate Transistors ist der Anschluss an die Werte der weltweit führenden selbstsperrenden GaN-Transistoren gelungen, deren Entwicklung hauptsächlich in Japan vorangetrieben wird.

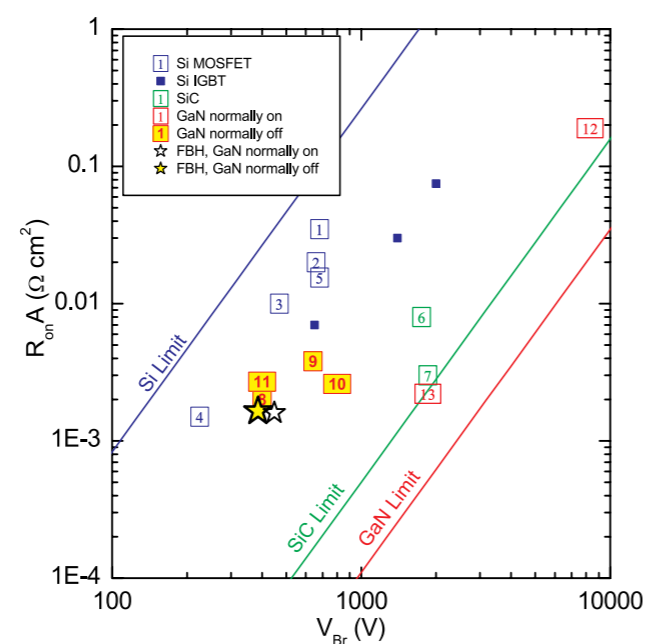
Abb. 4: Vergleich des spezifischen Einschaltwiderstands vs. Durchbruchspannung für Si-, SiC- und GaN-basierte Transistoren. Der gelbe Stern zeigt den selbstsperrenden p-GaN-HEMT.

Fig. 4: Benchmarking of the specific on-state resistance vs. breakdown strength for Si-, SiC- und GaN-based transistors. The yellow star represents the normally-off p-GaN HEMT.

the p-GaN has a higher barrier than the Schottky-type gate contact of a normally-on standard HEMT.

An additional benefit of the AlGaN buffer is the higher buffer-side barrier of the transistor channel. The buffer punch-through for the pinched transistor gets suppressed and the devices show an increased breakdown strength. The breakdown voltage for 0 V gate bias of the presented device is 380 V.

Compared to the established Si technology, the presented data show a switching transistor technology in GaN with an improved ratio of specific on-state resistance to breakdown strength, see fig. 4. With the presented p-GaN gate HEMT the link to the performance of worldwide leading normally-off GaN transistors has been managed.



GaN-MISFETs als Basis für effiziente Schaltungen

Der Einsatz von GaN-MISFETs ermöglicht Schaltungen mit hohen Wirkungsgraden, da der Gateisolator parasitäre Ströme unterbindet, die in der Regel zu Verlusten führen. Darüber hinaus erlaubt das MISFET-Konzept bei selbstsperrenden Transistoren im Gegensatz zum HEMT eine ausreichend weite Gateaussteuerbarkeit. Der Transistorkanal öffnet erst bei 0 V Gatespannung, welche für den HEMT wegen des aufkommenden Gatestroms schon bei etwa +2 V limitiert ist. Im Gegensatz dazu können GaN-MISFETs zu höheren positiven Gatespannungen hin ausgesteuert werden.

Sowohl das Gate-Isolatormaterial als auch die Isolator-Halbleiter Grenzschicht eines MISFETs müssen möglichst defektfrei sein, um Aufladungen und damit Verzerrungen der Transistorkennlinien zu verhindern. Derartige Transistoren wurden mit Al_2O_3 als Gateisolator realisiert. Die 10 nm dicke Al_2O_3 -Schicht wurde in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturforschung in Halle und der Purdue University in West-Lafayette (USA) mittels der Atomic-Layer-Deposition (ALD)-Technologie auf den AlGaN-Halbleiter aufgebracht. Dabei wird bei dem zyklischen ALD-Prozess das Material in molekularen Monolagen aufgebaut.

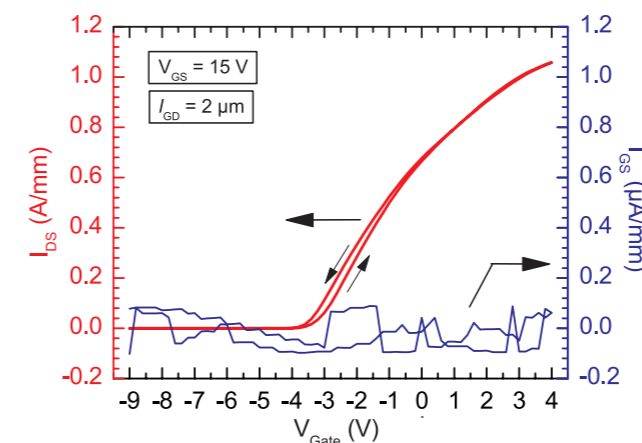


Abb. 1 zeigt die Transferkennlinie (rot) eines derartigen GaN-MISFETs. Die Hysterese beim Vor- und Zurückfahren der Kennlinie ist klein, was auf die erzielte geringe Defektdichte im Isolator hindeutet. Der Gatestrom (blau) ist über den gesamten Gatespannungsbereich mit $< 0,1 \mu\text{A}/\text{mm}$ sieben Größenordnungen kleiner als der maximale Drainstrom. Der Transistor kann bis zu einer Gatespannung von +4 V ausgesteuert werden, ohne dass der Gatestrom ansteigt.

Eine zuverlässige Gateisolatortechnologie erlaubt die Realisierung eines selbstsperrenden GaN-Anreicherungs-

GaN MISFETs as Basis for Efficient Electronics

The use of GaN MISFETs enables electronic circuits with highest efficiencies as the gate insulator suppresses parasitic leakage currents that are the origin for losses. Furthermore, the MISFET concept allows a much wider gate swing compared to HEMTs which is of particular benefit for normally-off transistors. The transistor channel of normally-off transistors opens at a gate bias slightly above 0 V. However gate bias is limited to $\sim +2 \text{ V}$ for standard GaN HEMTs because of the turn-on of the gate Schottky diode. Thanks to the gate insulator GaN MISFETs can be biased to much higher positive voltages.

There are strong requirements on the material quality of the gate insulator. Both, the gate insulator and the insulator-semiconductor interface should be as defect-free as possible in order to prevent any charging-up and thus distorted transistor characteristics. Atomic-Layer-Deposited (ALD) Al_2O_3 as gate insulators have turned out to be very promising for this task. In cooperation with Max-Planck-Institut für Mikrostrukturforschung in Halle (Germany) and Purdue University in West-Lafayette (USA), a 10 nm thick Al_2O_3 gate insulator layer was deposited onto the AlGaN semiconductor by means of ALD technology. In the cyclic ALD process the material grows in distinct molecular monolayers.

Abb. 1: Transferkennlinie (rot) und dazugehöriger Gatestrom (blau) eines selbstleitenden GaN-MISFET mit 10 nm ALD- Al_2O_3 .
Fig. 1: Transfer characteristic (red) and corresponding gate current (blue) of a normally-on GaN MISFET with 10 nm ALD- Al_2O_3 .

Fig. 1 shows the transfer characteristics (red) of such a GaN MISFET. The hysteresis by scanning forth and back the IV curve is small, indicating a low defect density in the insulator material. The gate current (blue) with $< 0,1 \mu\text{A}/\text{mm}$ is seven orders of magnitude lower than the maximum drain current. The transistor gate can be biased up to +4 V without any increase of gate current.

A reliable gate-insulator technology enables the realization of a normally-off enhancement-mode FET operating similar to a Si MOSFET. To obtain normally-off characteristics, the transistor channel gets interrupted by fully etching

FET, der ähnlich einem Si-MOSFET funktioniert. Selbstsperrendes Transistorverhalten wird dadurch erreicht, dass der Transistorkanal an der Gateposition durch Wegätzen der AlGaN-Barriere unterbrochen ist und das Gate über die Isolatorschicht vom Transistorkanal isoliert wird (Abb. 2). Abb. 3 zeigt die Realisierung eines derartigen selbstsperrenden MISFETs mit 10 nm ALD-Al₂O₃ als Gateisolator.

the AlGaN barrier. The gate is then isolated by the Al₂O₃ layer (fig. 2). Fig. 3 shows the realization of the described enhancement mode MISFET with 10 nm ALD-Al₂O₃ as gate insulator.

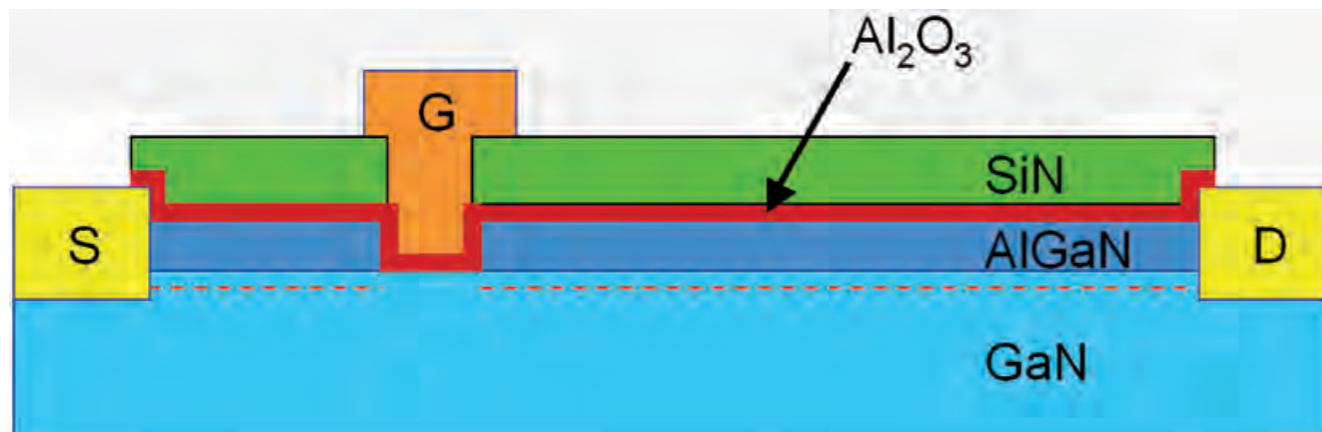


Abb. 2: Schema eines selbstsperrenden GaN-MISFETs. Die gestrichelte Linie stellt den (unter dem Gate unterbrochenen) Transistorkanal dar. Fig. 2: Scheme for a normally-off GaN MISFET. The dashed line displays the transistor channel (interrupted below the gate).

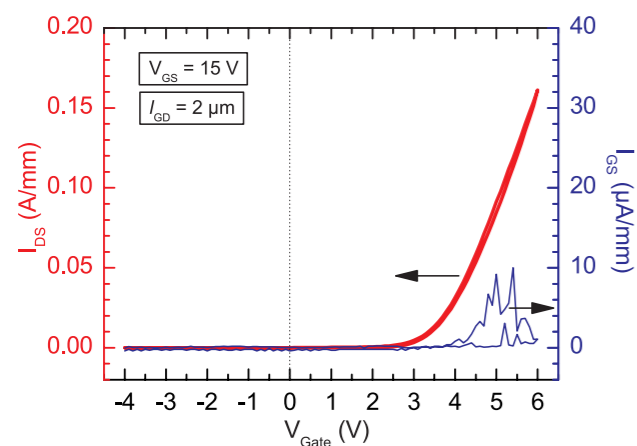


Abb. 3: Transferkennlinie (rot) und dazugehöriger Gatestrom (blau) eines selbstsperrenden GaN-MISFET mit 10 nm ALD-Al₂O₃. Fig. 3: Transfer characteristic (red) and corresponding gate current (blue) of a normally-off GaN-MISFET with 10 nm ALD-Al₂O₃.

Die Schwellspannung ist mit +2,5 V ausreichend positiv damit bei 0 V Gatespannung der Transistor einen zuverlässig sperrenden Zustand annimmt. Die erzielbaren Ströme im Transistorkanal sind mit 0,2 A/mm jedoch noch gering. Ein Aussteuern des Gates oberhalb +6 V würde den Transistor weiter öffnen, doch dies führt zu einer Schädigung des Gateisolators. Die Gateströme oberhalb 4 V Gatespannung sind Anzeichen hierfür. Dickeres und dichteres Al₂O₃ soll dieses Problem lösen – entsprechende Arbeiten laufen derzeit.

The threshold voltage of +2.5 V is sufficiently positive to ensure a well-defined off-state of the transistor at 0 V gate bias. The maximum drain current with 0.2 A/mm is still low. A higher gate bias above +6 V would help further opening the transistor, but would also damage the gate insulator. Gate currents above 4 V gate bias indicate the upcoming gate break-through. Thicker and more dense Al₂O₃ should solve this problem – respective devices are currently in progress.

Schnelle GaN-Transistoren mit integrierter Schottky-Draindiode

Die Effizienz von Verstärkern in Basisstationen für die Mobilkommunikation lässt sich durch die Einführung von Switchmode-Verstärkern wesentlich erhöhen. Rechnungen von Systemanbietern zeigen, dass durch die gesteigerte Effizienz und die daraus resultierende reduzierte Kühlleistung Energieeinsparungen auf Systemebene von bis zu 75% realisierbar sind.

Durch das Rekonstruktionsfilter am Ausgang von herkömmlichen Switchmode-Verstärkern treten kurzzeitig negative Impulse an den Drainkontakten der Schalttransistoren auf. Der in diesem Betriebszustand eigentlich gesperrte Endstufen-Transistor wird in umgekehrter Richtung leitfähig. Dieser Zustand führt zu Schaltverlusten und, falls der negative Impuls hoch genug ist, zu einer Zerstörung des Schalttransistors. Abhilfe bringen schnellschaltende Schutzdioden, die verhindern, dass die negativen Impulse die Drainelektroden der Schalttransistoren erreichen.

Bei dem am FBH entwickelten Konzept ist die Schutzdiode zur Erreichung hoher Schaltgeschwindigkeiten in die Funktion des Endstufentransistors integriert. Zu diesem Zweck wird der Drainkontakt des Transistors, der typischerweise als ohmscher Kontakt realisiert ist, durch einen Schottkykontakt ersetzt (Abb. 1). Der Transistor besitzt wie der klassische HEMT ein 2DEG, durch das der Elektronenfluss im Transistor von Source nach Drain realisiert wird. Der Fluss von Elektronen in Rückwärtsrichtung ist durch die Auslegung des Drainkontakts als Schottkydiode unterbunden.

Fast GaN Transistors with Integrated Schottky Drain Diode

The efficiency of amplifiers in base stations for mobile communications can be significantly improved by means of the emerging switch-mode amplifier technology. According to calculations of system providers, energy savings of up to 75% are reasonable due to higher efficiency and thus reduced cooling demand.

Switch-mode amplifiers need a reconstruction filter at the output that may lead to short negative pulses at the drain contacts of the power transistor. When the transistor is in off state, the transistor may become conductive in reverse direction. This causes additional losses and if the negative pulse is high enough it may lead to total destruction of the transistor. Fast switching protection diodes avoid such situation since they prevent the negative pulse from reaching the drain electrode.

As high switching speed is required, FBH has developed a protection diode that is integrated into the output stage transistor. The drain connection of the transistor, typically made as an ohmic contact, is replaced by a Schottky contact (fig. 1). As transistor a HEMT device is used where electrons flow in a 2DEG from source to drain contact. Flow of electrons in reverse direction is suppressed by replacing the regular drain contact with a Schottky diode.

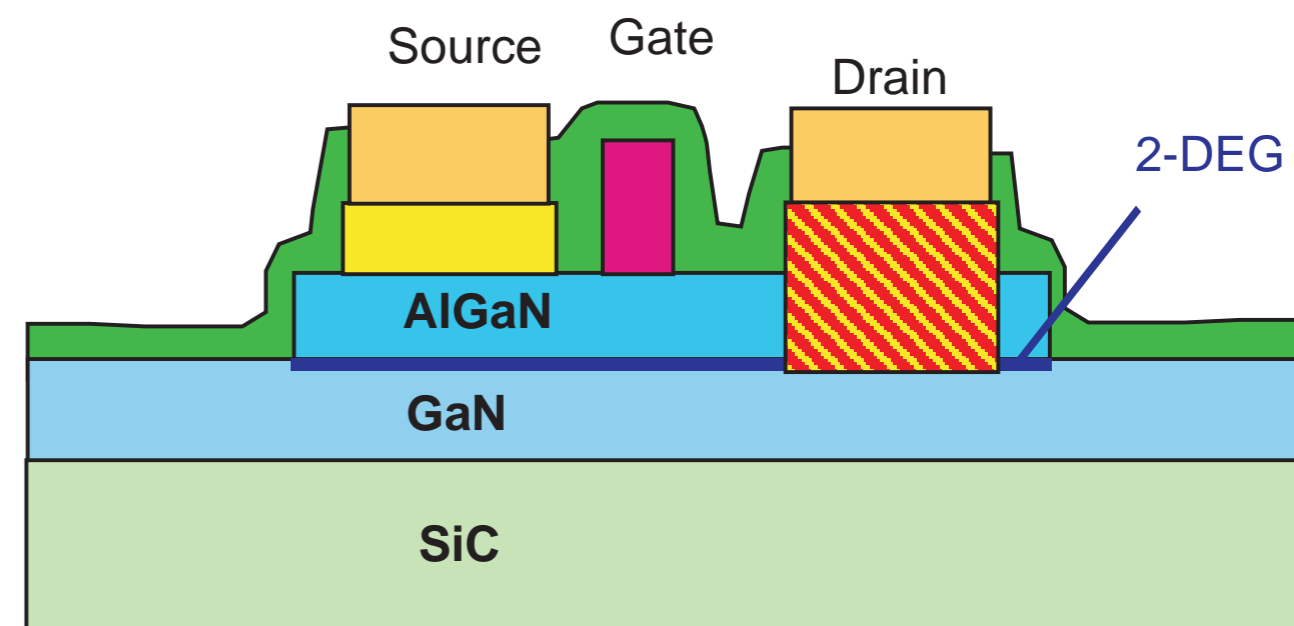


Abb. 1: Skizze des Schottky-Drain-Transistors mit Recess-Ätzung der AlGaN-Schicht (im schraffierten Bereich). Fig. 1: Sketch of Schottky drain transistor indicating recess etching of AlGaN barrier layer (hatched area).

Damit der Durchlasswiderstand der Draindiode gering ausfällt, wird im Drainbereich die AlGaN-Schicht bis zur GaN-Buffererschicht vollständig entfernt. Dadurch entfällt der Weg der Elektronen über die AlGaN-Barriere. Stattdessen findet der Leitungsvorgang zum jetzt seitlich befindlichen 2DEG durch den Buffer statt, der sich durch eine hohe Elektronenbeweglichkeit auszeichnet.

Die Draindiode sperrt den Schalttransistor im dritten Quadranten bis zu -100 V und erfüllt daher vollkommen die erforderliche Schutzfunktion. Durch die Draindiode ist die Steuerung des Ausgangsstroms im positiven Spannungsbereich ohne Beeinträchtigung möglich (Abb. 2). Die Leistungsmessung mithilfe des Load-Pull-Verfahrens ergibt eine Leistungsdichte von 9,5 W/mm bei 2 GHz mit 65 V Drainbias und zeigt somit ein Ergebnis im oberen Leistungsfeld.

Im digitalen Betrieb kann bei Pulsdauern von unter 0,5 nsec und einem Spannungshub von 28 Volt die volle Sperrfähigkeit der Draindiode für negative Spannungen nachgewiesen werden. Spannungspulse im Bereich positiver Drainspannungen ergeben eine gute Flankensteilheit. Diese Eigenschaften zeigen volle Funktionsfähigkeit für Switchmode-Verstärkerschaltungen.

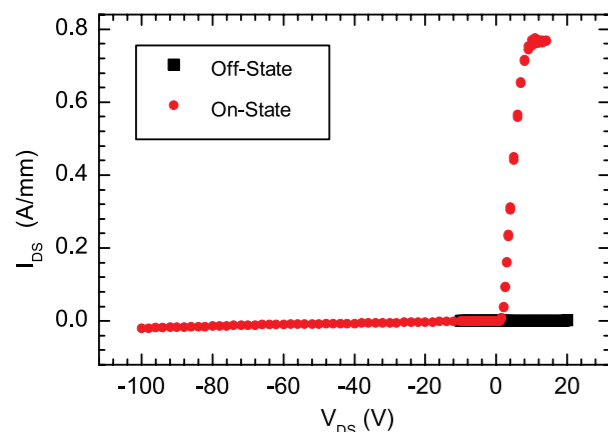


Abb. 2: Ausgangscharakteristik im On-State und Off-State zeigt das Reverse-Blocking durch die Schottky-Draindiode bis -100 V_{DS}.
Fig. 2: Output characteristic during on and off state indicating reverse blocking of the Schottky diode up to -100 V.

In order to achieve low forward resistance of the drain diode, the AlGaN barrier layer at the drain electrode is entirely removed by a dry etching process. Hence, electrons don't have to overcome the AlGaN barrier layer. Conduction to the 2DEG, which occurs laterally of the contact only, now proceeds through the GaN buffer layer and features high electron mobility in addition.

The blocking capability of the drain diode in reverse direction has been proven up to -100 V which is sufficient to achieve the required protection. Adjustment of the output current at positive voltage is not hampered by the drain diode. Output power at microwave frequencies obtained by load-pull measurements reveal a power density in the upper range of 9.5 W/mm at 2 GHz and 65 V drain bias.

For pulsed operation the functionality of the transistor has been proven showing full blocking capability for negative voltage pulses even below 0.5 nsec pulse duration and 28 V supply voltage. In addition, at positive drain voltage pulses reveal a high slew rate.

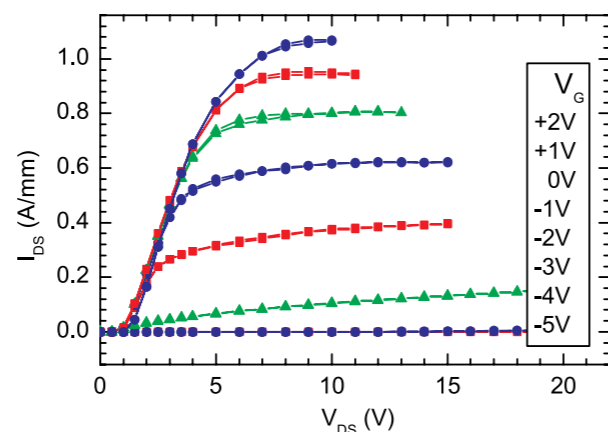


Abb. 3: Ausschnitt des Ausgangskennlinienfeldes bei positiver Drainspannung, zeigt ein um die Einschaltspannung der Diode verschobenes Kennlinienfeld.
Fig. 3: Detail of the output characteristic reveals I-V characteristic shifted by turn-on voltage of the drain diode.

SnPb-Bump-Technologie zur Kontaktierung von elektronischen Bauelementen

Die Flip-Chip Technologie zur Montage von Halbleiterbauelementen bietet im Gegensatz zur gängigen Drahtbondtechnik viele Vorteile. Ein wesentlicher Vorzug ist die Möglichkeit, bei der Kontaktierung prinzipiell die gesamte Chipfläche nutzen zu können und nicht wie bei der Drahtbondtechnik auf die Chipperipherie beschränkt zu sein. Das führt zu einer Einsparung von Halbleiterfläche und, infolge der kürzeren Leitungswege, zu verbesserten elektrischen Eigenschaften.

Abb. 1 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau einer gelöteten Flip-Chip-Verbindung auf einem organischen Substrat (Leiterplatte). Wesentlich für die zuverlässige Funktion der Verbindung ist das Design und die technologische Realisierung der „Under Bump Metallisierung“ (UBM). Sie besteht aus einer Diffusionsbarriere und einer Adhäsionsschicht. Die Diffusionsbarriere hat die Aufgabe, den Halbleiter und dessen Verdrahtungsebenen metallurgisch gegenüber dem Lotbump-System abzukoppeln. In der Regel besteht die Diffusionsbarriere aus Cr, Ti, TiW, WSiN oder anderen Materialien und ist nur 100 - 300 nm dick. Die Adhäsionsschicht, typisch Cu oder Ni, sorgt für die Ausbildung einer intermetallischen Verbindung mit dem Lot (IMC = intermetallic compound). In der Regel wird die letzte Schicht der Metallisierungssequenz durch eine dünne Au-Schicht vor Oxidation geschützt. Beim Löten wird diese Schicht vollständig in der Lotmatrix gelöst. Der Lotbump hat die Aufgabe, eine mechanisch stabile, niederohmige und stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Kontaktpad des Halbleiterchips und dem Kontaktpad der Leiterplatte herzustellen.

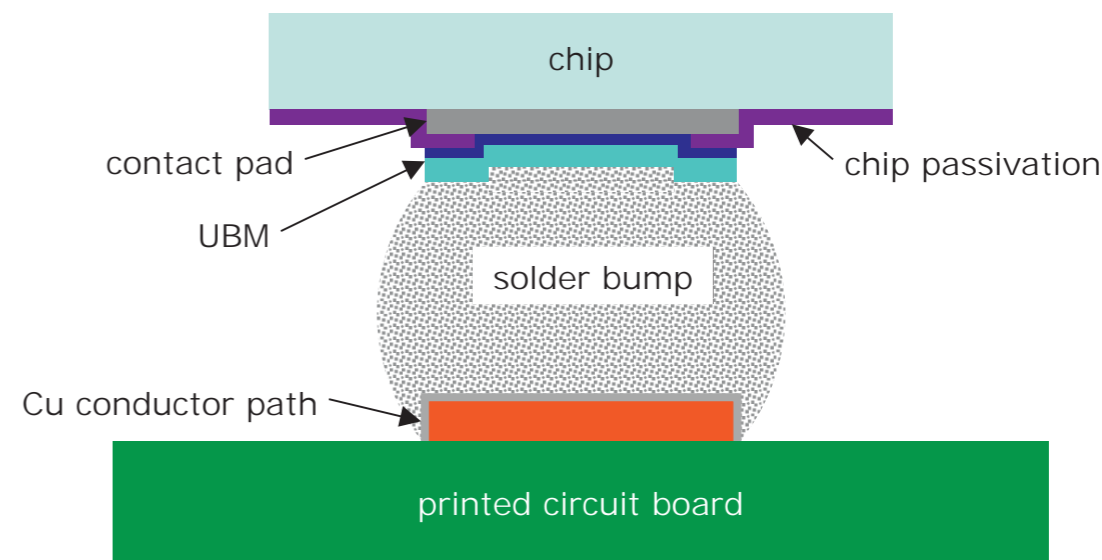


Abb. 1: Aufbau der Chip-PCB-Verbindung im Querschnitt.
Fig. 1: Cross-section of chip-PCB interconnect.

SnPb Bump Technology to Interconnect Electronic Devices

Flip-chip assembly of semiconductor chips features many advantages compared to wire bond technology. An essential benefit is the possibility to contact the whole chip surface without being limited to the chip periphery. This helps to save valuable semiconductor area and, due to shorter contact paths, to improve electric performance.

Fig. 1 shows a typical solder flip-chip interconnection on printed circuit board. For highly reliable flip-chip interconnections, design and technological realization of under bump metallization (UBM) play an important role. The UBM includes a diffusion barrier and an adhesion layer. A diffusion barrier is necessary to protect semiconductor and chip metallization from chemical reactions with the solder bump. It normally consists of Cr, Ti, TiW, WSiN or other materials and is only between 100 - 300 nm thick. An adhesion layer (typically Cu or Ni) on top of the UBM provides an interconnection between bump and chip side metallization by formation of an IMC (inter metallic compound). Usually the adhesion layer is covered by a thin gold layer in order to protect the metal from oxidation. During soldering it is completely dissolved in solder bump. The solder bump provides a mechanically stable low resistive interconnection between printed circuit board and chip. Highly reliable flip-chip interconnects need several microns thick adhesion layers considering material consumption in IMC. Therefore, Ni is very advantageous due to very slow liquid and solid-state reactions with the solder bump.

Für einen zuverlässigen Flip-Chip Aufbau muss die Adhäsionsschicht einige μm dick sein. Sie bildet während des Lötens mit dem Lot eine intermetallische Phase und wird somit zumindest teilweise verbraucht. Das Metall Ni ist hierfür sehr gut geeignet, da es mit dem flüssigen Lot kontrollierbar zu einer IMC reagiert und im erstarrten Zustand eine geringe Reaktionsrate aufweist.

Bei der Herstellung dieser Ni-Adhäsionsschichten dominieren bisher nasschemische Verfahren, wie beispielsweise galvanische oder außenstromlose Abscheidungen in wässrigen Elektrolyten. Sie lassen sich jedoch nur schwer in eine bestehende III/V-Halbleiter-Technologie integrieren. Es ist daher von Interesse, die komplette UBM, bestehend aus Diffusionsbarriere und Adhäsionsschicht mittels PVD-Verfahren (Sputtern oder Aufdampfen) herzustellen. Auf diese Weise lassen sich jedoch Ni-Schichten nur bis zu einer Dicke von etwa 200 nm abzuschneiden. Die Ursache dafür sind die hohen intrinsischen Spannungen in diesen Schichten.

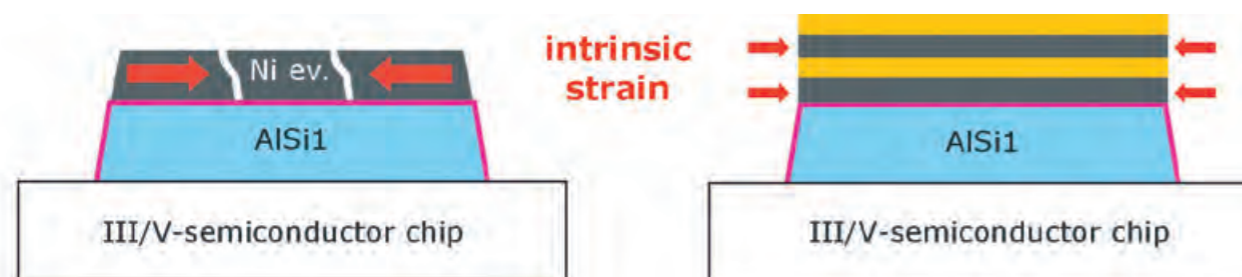


Abb. 2: Reduktion von mechanischen Spannungen in der Ni-UBM durch die Realisierung von Mehrlagenstrukturen mit duktilen Metallschichten (in diesem Fall Ni/Au-Schichten).

Fig. 2: Reduction of mechanical strain in Ni-UBM layer by incorporating multi-layer structures with ductile metal layers (Ni/Au layers in this case).

Das FBH hat nun ein neues Konzept zur Herstellung einer UBM mittels PVD entwickelt. Der Einbau von dünnen, duktilen Schichten in ein Ni-Schichtenpaket absorbiert mechanische Spannungen und ermöglicht eine mehrere μm dicke Ni-UBM. Die Adhäsionsschicht besteht demnach aus einer Sequenz von mehreren Ni-Schichten, welche durch eine hauchdünne Au-Schicht voneinander getrennt sind. Die alternierende Ni-Au-Abscheidung erfolgt in der gleichen Anlage bis die gewünschte Schichtdicke erreicht ist. Abb. 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer kompletten UBM-Struktur. Diese UBM wird chipseitig mit der Diffusionsbarriere aus amorphem WSiNx, hergestellt durch Sputtern, kombiniert. Die Diffusionsbarriere ermöglicht wegen des isotropen Abscheidungsverfahrens eine vollständige Verkapselung des Anschlusspads.

Abb. 3 zeigt einen am FBH realisierten Flip-Chip-Aufbau mit einer sechsfachen Ni/Au-Schichtfolge im Querschliff. Der Bumping-Prozess der eutektischen Sn63Pb37-Lotbumps erfolgte mit einem Solder-Ball-Bonder der Firma

The UBM is commonly realized by electroplating and electroless metallization using water-based electrolytes, though it is difficult to integrate these technologies into an existing III-V semiconductor technology. Physical vapor deposition (PVD), such as evaporation or sputtering, is more suitable for this purpose. However, obtaining Ni layer thicknesses beyond 200 nm is technologically very difficult because of high intrinsic strain build up in the as deposited layers.

Consequently, FBH has developed a new technology for the Physical Vapor Deposition (PVD) of a sufficient amount of Ni for UBM. Subsequent deposition of alternating layers of nickel and thin layers of a ductile metal like gold, which interrupts mechanical strain accumulation, allows to process several microns thick UBM. An alternating deposition scheme of both metals up to the requested UBM thickness has been implemented in the same evaporation facility. Fig. 2 shows the principal structure of such an UBM. The UBM is connected to the chip metallization scheme by

using a sputtered WSiN diffusion barrier. Due to isotropic deposition behavior of sputtering, the chip metallization is completely encapsulated by the WSiNx barrier.

Fig. 3 shows a cross-section of the flip-chip UBM structure with 6 Ni/Au layers. Eutectic Sn63Pb37 solder bumps have been bonded by utilizing a PacTech solder bump bonder. The fabricated flip-chip interconnection has a very low electrical resistance being close to its theoretical value. Shear tests implemented after flip-chip assembly to printer circuit board have shown very high shear strength of 50 N/mm². Additionally, several reliability tests like high temperature storage tests (HTS) at +125°C, humidity tests at 85°C/ 85% r.h., and electromigration tests at 6.1 x 10³ A/cm² and 100°C have been applied to the assembled devices for 1000 hours. Not any or only very small changes of the electrical and mechanical properties have been seen during these aging tests. Finally, the chips have been cross-sectioned by grinding and polishing after different reliability testing steps. These investigation showed,

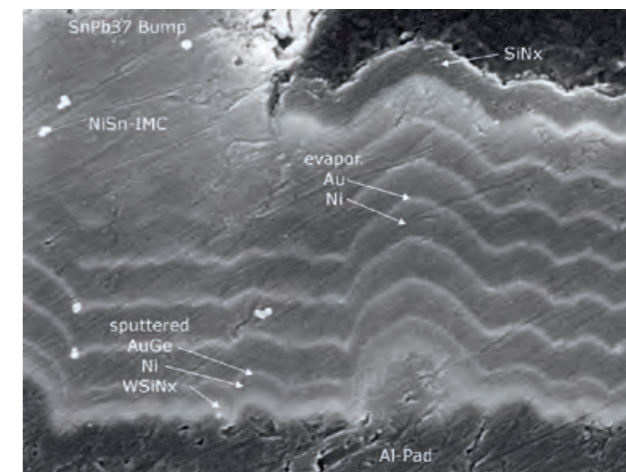


Abb. 3: REM Querschnitt eines SnPb-Bumps auf einer Ni/Au Mehrlagen UBM.
Fig. 3: SEM Cross-section of a SnPb bump on top of a Ni/Au multi-layer UBM.

PacTech. Die hergestellte Flip-Chip-Verbindung weist einen niedrigen elektrischen Widerstand auf, der mit ca. 16 m Ω sehr nahe an dem theoretisch erreichbaren Wert liegt. Die Bumps zeigen nach dem Verlöten mit der Leiterplatte eine sehr gute Scherfestigkeit von ca. 50 N/mm². Um die Zuverlässigkeit dieser neu entwickelten UBM zu testen, wurden Hochtemperatur-Lagerungstests bei +125°C, Feuchte-Wärme-Lagerungstests bei 85°C/ 85% r.F. und Elektromigrationstests bei einer Stromdichte von 6,1 x 10³ A/cm² und 100°C für jeweils 1000 Stunden überprüft. Die Tests haben gezeigt, dass keine bzw. nur eine geringe Änderung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften dieser Verbindung auftreten. Die metallographischen Untersuchungen der Querschliffe bestätigten diese Ergebnisse, und konnten zeigen, dass die realisierte UBM nach dem Löten nur noch in sehr geringem Umfang mit dem Lotbump reagiert und die Diffusionsbarriere sehr wirksam ist. Die Lötverbindung der Bumps mit dem Chip ist daher extrem langzeitstabil.

Auf diese Weise ist es gelungen, eine neuartige Ni-basierte UBM mit hoher Zuverlässigkeit zu entwickeln und in Verbindung mit eutektischen SnPb-Lotbumps einzusetzen. Der Herstellungsprozess dieser UBM lässt sich problemlos in die III/V-Halbleiter-Technologie integrieren. Damit ist die am FBH entwickelte UBM insbesondere für Technologien, bei denen keine nasschemischen Prozesse erwünscht sind, attraktiv.

that the solid-state reaction between solder bump and UBM is very slow and that the diffusion barrier provides an efficient protection. This ensures a long time stability of the interconnect.

The main result of this work is a newly developed Ni-based UBM which was qualified for eutectic SnPb solder bumps. The new UBM technology can be easily integrated into existing III-V semiconductor processes. Thus, this new UBM technology developed by FBH is a very interesting option, especially for technologies where wet deposition processes like electroplating and electroless metalization shall not be applied.

DIODENLASER
DIODE LASERS

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. Zu seinen Kernkompetenzen gehören Hochleistungsdiodenlaser, die vor allem hinsichtlich ihrer Ausgangsleistungen und ihrer Brillanz einzigartig sind. Das FBH entwickelt diese Laser mit einer sehr großen Vielfalt von monolithischen und hybriden Bauformen und Materialkombinationen bei verschiedenen Wellenlängen. Als Schlüsselkomponenten werden sie in den optischen Technologien eingesetzt, beispielsweise als Pumplaser in Lasersystemen für die Materialbearbeitung, in der Medizintechnik (Desinfektion, photodynamische Krebstherapie), der Unterhaltungstechnologie (Displays) sowie in Systemen der Grundlagenforschung (neuartige Röntgenlaser-Systeme, Systeme zur Emission von Terahertz-Strahlung). 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.

Neben der Chipentwicklung gewinnt die hybride Integration von aktiven und passiven Bauelementen auf einer mikrooptischen Bank zunehmend an Bedeutung. Auf diese Weise entstehen kompakte Strahlquellen hoher Brillanz. Sie zeichnen sich durch geringe Abmessungen, einen hohen Konversionswirkungsgrad und damit geringen Energieverbrauch sowie hohe Lebensdauern und Wartungsfreiheit bei relativ niedrigen Herstellungskosten aus.

Im Jahr 2008 hat das FBH wieder eine Reihe neuartiger Strahlquellen mit außerordentlichen Kennzahlen entwickelt. So konnte erstmalig auch das Potenzial sehr leistungsstarker Breitstreifenlaser (20 W aus $100\ \mu\text{m}$ @ 980 nm) in Lebensdauertests nachgewiesen werden. Die Spitzenleistung im Kurzpulsbetrieb von Breitstreifenlasern wurde zudem mit circa 1,6 W pro μm Streifenbreite weiter erhöht, Hauptarbeiten zielen nun auf die Verbesserung der räumlichen Strahlqualität. Mit DBR-MOPA-Strukturen als IR-Strahlquelle wurden mehr als 1 W optische Ausgangsleistung im grünen und blauen Spektralbereich nach Frequenzverdopplung erreicht. Stabile hybrid-integrierte Strahlquellen wurden bei 488 nm und 671 nm realisiert und als industrietaugliche Funktionsmuster an die Projektpartner geliefert. Durch ihren niedrigen Energieverbrauch sind sie insbesondere für mobile Anwendungen in der Sensorik, beispielsweise für die Raman-Spektroskopie geeignet.

Diode Lasers

The Ferdinand-Braun-Institut is one of the world leading research institutes for gallium arsenide based diode lasers. Its core competencies include high-power diode lasers with unique properties especially with respect to their optical output-power and brightness. The FBH develops these lasers using a wide variety of monolithic and hybrid designs and material combinations to deliver exceptional performance at many different wavelengths. FBH's lasers are used as key components in optical technologies, e.g. as pump sources in laser systems for materials processing, in medical technology (disinfection, photodynamic cancer therapy), and in entertainment technology (displays) as well as in systems for basic research (novel X-ray laser systems, systems for the emission of terahertz radiation). With its core competencies, the FBH covers the whole technology value chain: from simulation and design of diode lasers, through their technological implementation up to the construction and delivery of reliable, high-performance operational diode laser modules and microsystems.

In addition to chip development, hybrid integration of active and passive devices on one compact micro-optical bench is becoming increasingly important. Such micro bench systems enable the development of highly reliable, maintenance-free and compact light sources with high brightness. They can be produced at comparably low manufacturing costs and are further distinguished by their small dimensions, a high conversion efficiency and thus low energy consumption.

In 2008, the research team at the FBH developed a range of novel optical sources with new world record performance levels. For example, life time tests with very powerful broad-area lasers at high output powers (20 W from $100\ \mu\text{m}$ @ 980 nm) were performed, demonstrating their potential for reliable operation in industrial applications. The peak performance in short-pulse operation of broad-area lasers was further pushed up to about 1.6 W per μm stripe width. FBH now turns its attention to further improving the spatial beam quality. DBR MOPA structures were realized using high yield, industry-compatible device technology, enabling more than 1 W optical power in the green and blue spectral range achieved by frequency doubling in a simple single pass scheme. Building on the high quality of the laser chips and new mounting designs, stable, hybrid-integrated compact laser sources at 488 nm and 671 nm have been developed with a low energy consumption suitable for mobile use in material detection applications such as Raman spectroscopy.

Durchbruch bei der optischen Leistung mit nachgewiesener Zuverlässigkeit von Breitstreifenlasern mit 100 μm Apertur

Aufgrund ihrer Zuverlässigkeit bei zugleich hohen Ausgangsleistungen werden Hochleistungslaserdioden immer häufiger in industriellen Anwendungen eingesetzt. Am FBH ist es im vergangenen Jahr gelungen, die Ausgangsleistung der Diodenlaser und deren Zuverlässigkeit nachweislich und deutlich zu verbessern. Untersucht wurden Hochleistungs-Breitstreifenlaser mit einer Ausgangsapertur um 100 μm und einer Betriebswellenlänge um 980 nm, die insbesondere als Faserlaser-Pumplichtquellen kommerziell sehr attraktiv sind. Aktuell werden Laserquellen in der Leistungsklasse 8 - 10 W mit Zuverlässigkeitsnachweis kommerziell angeboten. Bei früheren Untersuchungen wurde am FBH demonstriert, dass im Dauerstrichbetrieb 20 W Spitzenleistung und 15 W mit nachgewiesener Zuverlässigkeit erreichbar sind. Ziel der Arbeiten war es daher im vergangenen Jahr, die Ausgangsleistung mit Zuverlässigkeitsnachweis über 15 W hinaus zu steigern.

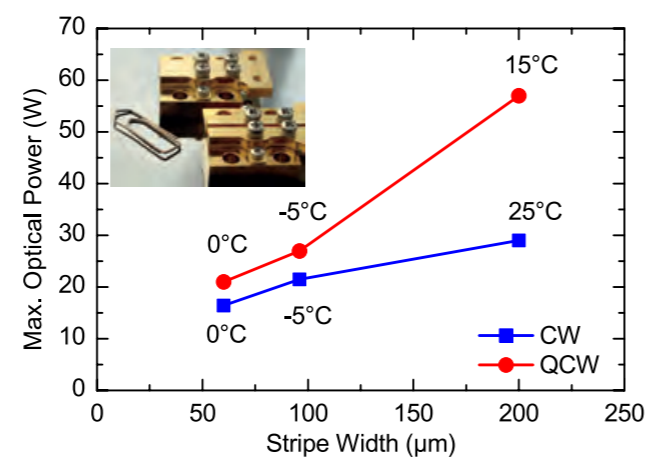
Um die optische Ausgangsleistung der Laser zu maximieren, wurde eine Serie von Laserdioden mit unterschiedlichen Streifenbreiten (60 μm , 96 μm und 200 μm) bei 4 mm Resonatorlänge am FBH hergestellt und charakterisiert. Die maximale Leistung wurde sowohl im Dauerstrichbetrieb (CW) als auch im Quasi-Dauerstrichbetrieb (QCW, hier 200 μs 10 Hz) ermittelt. Der Einsatz von Messkammern zur Vermeidung von Kondenswasser ermöglichte es, die maximale Ausgangsleistung im Temperaturbereich von -10°C bis 25°C aufzunehmen. Abb. 1 fasst die Messergebnisse zusammen. So erreichten beispielsweise Laserdioden mit 60 μm Streifenbreite 21 W QCW- und 16,4 W CW-Spitzenleistung. Die QCW-Spitzenleistung entspricht einer homogenen Leistungsdichte von 350 mW/ μm und damit einer internen Leistungsdichte von 38 MW/cm². Diese Werte liegen deutlich über der bis dahin veröffentlichten maximalen Ausgangsleistungsdichte von 253 mW/ μm . Bei den Messungen wurde verschiedene Ausfallmoden festgestellt. Die derzeitige Materialanalyse der Ausfallursachen wird zukünftige Weiterentwicklungen ermöglichen.

Abb. 1: Zusammenfassung der QCW- und CW-optischen Spitzenleistungen für Diodenlaser als Funktion der Streifenbreite bei den angegebenen Betriebstemperaturen. Das Foto zeigt zwei montierte Laserdioden.
Fig. 1: Summary of maximum QCW and CW optical power achieved for diode lasers with different stripe widths, with measurement temperature noted. Example packaged devices are shown as an inset.

Breakthrough in Reliable Optical Output Power Demonstrated in 100 μm Stripe Broad Area Laser Diodes

High-power diode lasers are increasingly the tools of choice for industrial laser applications, enabled by their high reliability at high power levels. The FBH has in the past year further improved the reliable output power of their diode lasers, specifically, broad area diode lasers with operation wavelength of 980 nm and stripe widths in the 90 - 100 μm range, important commercially as pumps for fiber lasers. Such sources are commercially available with power levels in the 8 - 10 W range. Previous work at the FBH showed that peak power levels of 20 W and reliable powers of 15 W are achievable. In the past year, FBH's scientists have studied how much further these 15 W structures can be driven.

In order to determine the maximum achievable output power of this material several packaged devices were tested with stripe widths of 60 μm , 96 μm and 200 μm and cavity length of 4 mm, increasing current and reducing temperature until failure was finally observed. The epitaxial growth, processing, facet coating and packaging technology required to deliver these results were all performed at the FBH facility. The lasers were tested at different package temperatures under continuous wave (CW) and quasi-continuous wave (QCW, here 200 μs 10 Hz) conditions. All measurements were performed in a controlled atmosphere chamber to prevent condensation. Fig. 1 summarizes the results and shows that 60 μm devices, for example, reached 21 W QCW and 16.4 W CW. The peak QCW power corresponds to a linear power density of 350 mW/ μm (internal optical power density of 38 MW/cm²). The highest previously reported value from a 9xx nm device is 253 mW/ μm . A mixture of failure modes was observed. Materials analysis in FBH laboratories of the root causes of these failures will help to further improve performance.



Für industrielle Anwendungen ist nicht die Spitzenleistung sondern die Ausgangsleistung mit nachgewiesener Zuverlässigkeit entscheidend. Daher wurde eine so genannte „Treppemessung“ durchgeführt, um schnell Informationen zur Zuverlässigkeit zu erzielen. In der exemplarisch dargestellten Messung (Abb. 2) wurde der Betriebsstrom, der wichtigste Beschleunigungsfaktor im Alterungsprozess von Laserdioden, stufenweise von 11 A auf 22 A erhöht. Um die interne Betriebstemperatur der untersuchten Laserdiode mit 60 μm Streifenbreite konstant zu halten, wurde die Kammertemperatur abgesenkt. So wurde die Laserdiode während des typischen 48-Stunden-Tests bis zum Überrollpunkt der Ausgangsleistung ohne Degradation betrieben. Daraus ergibt sich eine CW-Ausgangsleistung mit Zuverlässigkeitsnachweis von 273 mW/ μm .

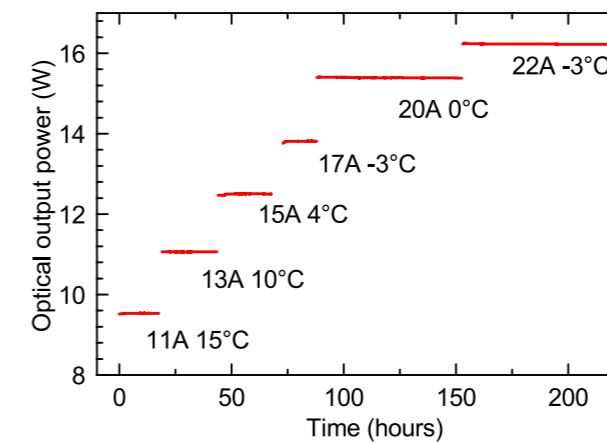


Abb. 2: Stromabhängige Treppemessungen im CW-Betrieb (optische Leistung als Funktion der Alterungszeit) für einen Diodenlaser mit 60 μm Streifenbreite.
Fig. 2: CW current step stress test (optical power versus stress time) for a 60 μm stripe width device.

Obwohl mit Treppemessungen schnell die maximale mögliche Ausgangsleistung mit Zuverlässigkeitsnachweis bestimmt werden kann, benötigen industrielle Anwender den Nachweis des Hochleistungsbetriebs über einen langen Zeitraum bei festen Messbedingungen und Raumtemperatur. Dafür wurden je zwei Laserdioden mit 60 μm und 96 μm Streifenbreite bei konstantem Betriebsstrom und 21°C betrieben (Kennlinien siehe Abb. 3). Die Laserdioden mit 96 μm Streifenbreite wurden bei 25 A Betriebsstrom - das entspricht einer Ausgangsleistung von 18 - 20 W - über mehr als 4000 Stunden ohne Ausfall betrieben. Eine Laserdiode mit 96 μm Streifenbreite fiel nach 4200 Stunden aufgrund eines Aufbaufekts aus, die andere wird weiter betrieben. Eine Laserdiode mit 60 μm Streifenbreite und 10 W Ausgangsleistung erreichte bislang mehr als 3500 Stunden Betriebsdauer ohne Ausfall, die andere 2000 Stunden.

Although it is useful to know the peak achievable power, the critical parameter is the peak reliable power. To obtain rapid information, a „step stress“ test can be performed, where devices are driven for an extended period with successively more aggressive operating conditions, until failure begins to occur. Here, FBH has performed current step stress testing as this is typically the strongest accelerator of failure in diode lasers. A 48 hour step length was typically used. Each time the current was increased, the temperature of the heat sink was also reduced so that the internal semiconductor temperature remained constant. Fig. 2 shows an example CW step stress test for a 60 μm stripe width device. The device operated without degradation up to 22 A (16.4 W, 273 mW/ μm), where it rolled over. That is, reliable commercial CW power levels in the range of 273 mW/ μm are conceivable.

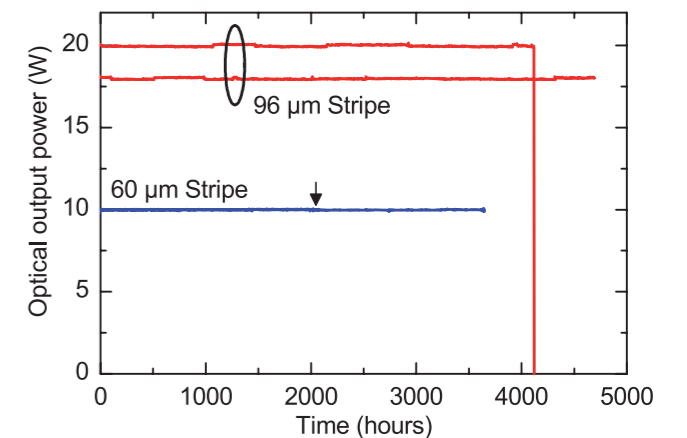


Abb. 3: CW-Alterungsuntersuchungen bei 21°C: zwei Laserdioden mit 60 μm Streifenbreite bei 10 W Leistung (blaue Linien) und zwei Laserdioden mit 96 μm Streifenbreite bei 18 bzw. 20 W Leistung (rote Linien). Die eine Laserdiode mit 60 μm Streifenbreite wurde bis dato nur 2000 Stunden betrieben (Pfeil).
Fig. 3: Extended CW test results at 21°C for two 60 μm stripe devices at 10 W and two 96 μm stripe devices close to 20 W. One 60 μm stripe device has been in operation to date for just 2000 hours, marked with an arrow.

Although low temperature step stress testing reveals the maximum achievable reliable power, real users require information on operation over extended periods at room temperature. 60 μm stripe and 96 μm stripe samples were therefore tested at fixed power at 21°C. The results are shown in fig. 3. For 25 A operation current, corresponding to 18 - 20 W output power, FBH finds 96 μm stripe devices operate for over 4000 hours without failure. One sample failed at 4200 hours for a packaging defect, one sample is still operating. One 60 μm stripe devices has operated without failure to date for over 3500 hours at 10 W, a further sample has to date reached 2000 hours without failure.

Im Jahr 2008 wurden am FBH schlussendlich 980 nm Breitstreifenlaser mit internen Spitzenleistungen bis 38 MW/cm² demonstriert. Treppennmessungen haben gezeigt, dass diese Laserdioden auch bei ihrer Roll-over-Leistung über einen längeren Zeitraum betrieben werden können. Laserdioden mit 96 µm Streifenbreite und 20 W Ausgangsleistung zeigten auch im Dauerstrichbetrieb bei 21°C über mehr als 4000 Stunden keinen Ausfall. Laserdioden mit 60 µm Streifenbreite emittierten 10 W Leistung ohne Ausfall für mehr als 3000 Stunden. Damit bieten diese Laserdioden wesentlich verbesserte Ausgangsleistungen als die aktuell kommerziell erhältlichen Diodenlaser und eignen sich ausgezeichnet für zukünftige Industrie-Lasersysteme.

Veröffentlichungen // Publications

K. Paschke, S. Einfeldt, A. Ginolas, K. Häusler, P. Ressel, B. Sumpf, H. Wenzel, and G. Erbert, „15-W reliable operation of 96-µm aperture broad-area diode lasers emitting at 980 nm,“ Conference Digest CLEO/QELS USA, CMN4 (2008).

P. Crump, G. Blume, K. Paschke, R. Staske, A. Pietrzak, U. Zeimer, S. Einfeldt, A. Ginolas, F. Bugge, K. Häusler, P. Ressel, H. Wenzel, and G. Erbert, „20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 µm,“ Proc. SPIE 7198, 719814 (2009), accepted in September 2008, presented in January 2009 at Photonics West.

In conclusion, in the past year the FBH has demonstrated that 980 nm broad area lasers can reach a peak QCW power density of up to 38 MW/cm². Step stress testing shows these structures can operate for extended periods up to their rollover powers without failure. Extended testing at 21°C shows that 96 µm devices can operate close to 20 W for > 4000 hours and 60 µm devices at 10 W for > 3000 hours without failure. Such devices have substantially improved brightness over current commercially available structures and are good candidates for use in future industrial laser systems.

Laterale Strahleigenschaften von Breitstreifen-Lasern mit strukturierten Kontakten

Für den direkten Einsatz von Diodenlasern zur Materialbearbeitung wird eine hohe optische Ausgangsleistung und eine gute Strahlqualität von $M^2 < 10$ benötigt. Allerdings nimmt mit steigenden Leistungen die laterale Strahlqualität von üblicherweise eingesetzten Breitstreifenlasern kontinuierlich ab. Hauptursache ist die Vergrößerung der Fernfelddivergenz durch die Überlagerung von immer mehr lateralen Lasermoden bei nahezu gleichbleibender Nahfeldbreite. Zur Gewährleistung einer guten Strahlqualität ist folglich eine Beschränkung der Modenanzahl notwendig. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „Grundlagen für Diodenlaser der nächsten Leistungsgeneration“ wurde am FBH die Abhängigkeit der lateralen Modenstruktur von der Ausgangsleistung detailliert untersucht.

Dazu wurden bei 1080 nm emittierende Laser mit einem 400 µm breiten Kontaktstreifen hergestellt, die aus 10 µm breiten Einzelstreifen mit einem Abstand von 10 µm zueinander bestehen. Die elektrische Isolierung wurde durch eine He-Implantation der hochdotierten p-Kontaktschicht erreicht. Durch die Strukturierung wird die Ladungsträgerdichte in der aktiven Schicht und somit die optische Verstärkung und der Brechungsindex mit der entsprechenden Periode von 20 µm moduliert.



Lateral Beam Properties of Broad Area Lasers with Structured Contacts

The direct application of diode lasers for material processing requires both high optical output power and good beam quality with a beam propagation factor $M^2 < 10$. However, the lateral beam quality of commonly used broad area lasers decreases continuously when increasing power. This is mainly caused by the rising far field divergence due to superposition of more and more lateral modes and a near field width remaining constant. In order to ensure good beam quality at high output power, the number of lasing modes must be restricted. The dependence of the lateral mode structure from the output power has been investigated in detail within the BMBF-funded project „Foundations for diode lasers for the next power generation“.

For this purpose, diode lasers emitting at 1080 nm were fabricated with 400 µm wide electrical contacts consisting of 10 µm single stripes and separated by 10 µm gaps. The electrical insulation was realized by shallow He implantation of the highly doped contact layer. Due to this structuring, carrier density in the active layer and hence the optical gain as well as the refractive index is modulated with a period of 20 µm.

Breitstreifenlaser auf C-Mount.
Broad area laser on c-mount.

In den Abbildungen 1 und 2 werden die lateralen Fern- bzw. Nahfeldprofile von 4 mm langen Lasern dargestellt, welche im Quasi-Dauerstrichbetrieb (500 µs Pulslänge, 20 Hz Wiederholrate) betrieben wurden. Die Darstellung a) zeigt die Intensitätsprofile kurz oberhalb der Laserschwelle bei einer sehr kleinen Ausgangsleistung von 5 mW (2,6 A Strom). Das Fernfeld weist zwei ausgeprägte Emissionskeulen bei ca. $\pm 1,5^\circ$ auf. Das Nahfeld zeigt eine ausgeprägte Durchmodulation im Zentrum und fällt zu den Rändern des aktiven Streifens (bei $\pm 200 \mu\text{m}$) hin ab. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine einzelne optische Supermode lasert, die sich über alle Einzelstreifen erstreckt und deren Intensität am Rande verschwindet.

Figs. 1 and 2 show the lateral far- and near-field profiles of 4 mm long lasers, which were operated under quasi-continuous-wave conditions (500 µs pulse width, 20 Hz repetition rate). In figs. 1a) and 2a) the intensity profiles are depicted just above threshold at a very small output power of 5 mW (current 2.6 A). The far-field profile is characterized by two pronounced lobes at angles of $\pm 1.5^\circ$. The near field exhibits a strong modulation in the center which is reduced towards the edge of the active stripe (at $\pm 200 \mu\text{m}$). This leads to the conclusion, that a single optical super mode lases, which extends over all stripes and whose intensity vanishes at the boundary. At a power of 5 W (current 8.9 A) several super modes reach threshold, which

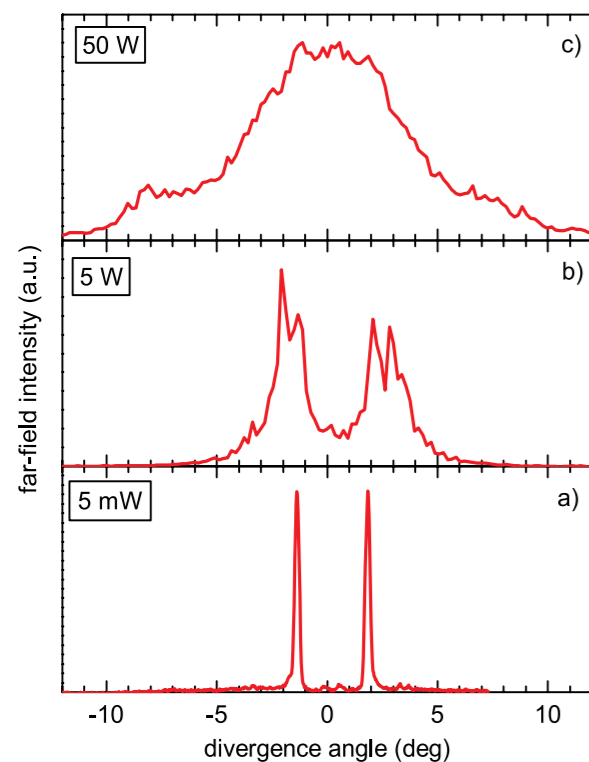


Abb. 1: Laterale Profile der relativen Intensität des Fernfeldes als Funktion des Divergenz-Winkels bei verschiedenen Ausgangsleistungen.
Fig. 1: Lateral profiles of the relative far-field intensity at different output powers.

Obwohl bei einer Leistung von 5 W (8,9 A Strom) mehrere Supermoden angeschwungen sind, was aus den breiteren, strukturierten Emissionskeulen des Fernfeldes und dem unregelmäßigen Nahfeldprofil folgt (Darstellung b), ist die Strahlqualität einer Emissionskeule besser als die eines Breitstreifenlasers ohne strukturierte Kontakte bei äquivalenter Ausgangsleistung. Die Darstellung c) zeigt, dass bei einer sehr hohen Leistung von 50 W (73,4 A) das Fernfeld nur noch eine breite Emissionskeule um 0° herum besitzt. Das Nahfeld ist entsprechend der Anzahl der Einzelstreifen (20) moduliert, zeigt aber im Gegensatz zur Darstellung a) so gut wie keinen Abfall zum Rand hin. Daraus lässt sich ableiten, dass jeder Einzelstreifen optisch von den benachbarten Streifen entkoppelt ist. Das gemessene Fernfeld ergibt sich folglich aus der inkohärenten Überlagerung der Fernfelder der emittierenden Einzelstreifen.

Die Leistungsabhängigkeit der Strahlprofile lässt sich wie folgt erklären. Mit zunehmendem Strom erhöht sich die Temperatur im Bereich jedes Einzelstreifens aufgrund der entstehenden Jouleschen Wärme. Da der Brechungsindex proportional mit der Temperatur zunimmt, bildet jeder Einzelstreifen für sich einen lateralen Wellenleiter heraus, sodass die optische Kopplung zwischen den Einzelstreifen immer mehr abnimmt und jeder Einzelstreifen in zunehmendem Maße als selbstständiger Laser arbeitet.

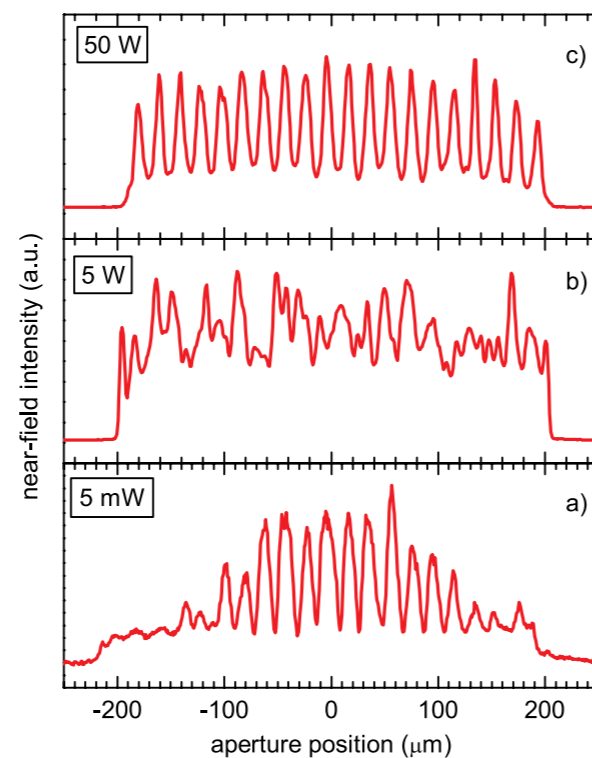


Abb. 2: Laterale Profile der relativen Intensität des Nahfeldes als Funktion des Ortes auf der Austrittsfläche bei verschiedenen Ausgangsleistungen.
Fig. 2: Lateral profiles of the relative near-field intensity at different output powers.

results from the broader and structured far-field lobes and the irregular near field (figs. 1b) and 2b)). However, the beam quality of a single lobe is still better than that of a broad area laser without structured contacts at the same output power. Figs. 1c) and 2c) reveal, that at a very high power of 50 W (73.4 A) the far field exhibits only a broad maximum around 0°. The near field is modulated corresponding to the number of single stripes (20) and shows in contrast to fig. 2a) almost no drop to the edge. Therefore, every single stripe is optically decoupled from the adjacent ones and the measured far field results from incoherent superposition of the far fields of the emitting single stripes.

The power dependence of the beam profiles can be explained as follows. With increasing current, temperature within the region of the single stripes rises because of the Joule heat produced. Due to the fact that the refractive index increases proportionally to the temperature, within every single stripe a lateral waveguide is created. This leads to decreasing optical coupling between the adjacent stripes and every single stripe increasingly operates as an independent laser.

Hohe Brillanz und hohe Ausgangsleistung: Trapezlaser mit integriertem Bragg-Gitter

Die Brillanz von Hochleistungs-Diodenlasern ist ein Schwerpunkt der Forschung am Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik. Diodenlaser hoher Brillanz ermöglichen ein verbessertes Pumpen von Faser- und Festkörperlaser, sowie Anwendungen in der direkten Materialbearbeitung und der Frequenzkonversion für Displayanwendungen. Die Brillanz einer Laserdiode ist über folgenden mathematischen Zusammenhang definiert:

$$\beta_{\lambda} = \frac{\beta}{\Delta\lambda} \quad \text{Brilliance}$$

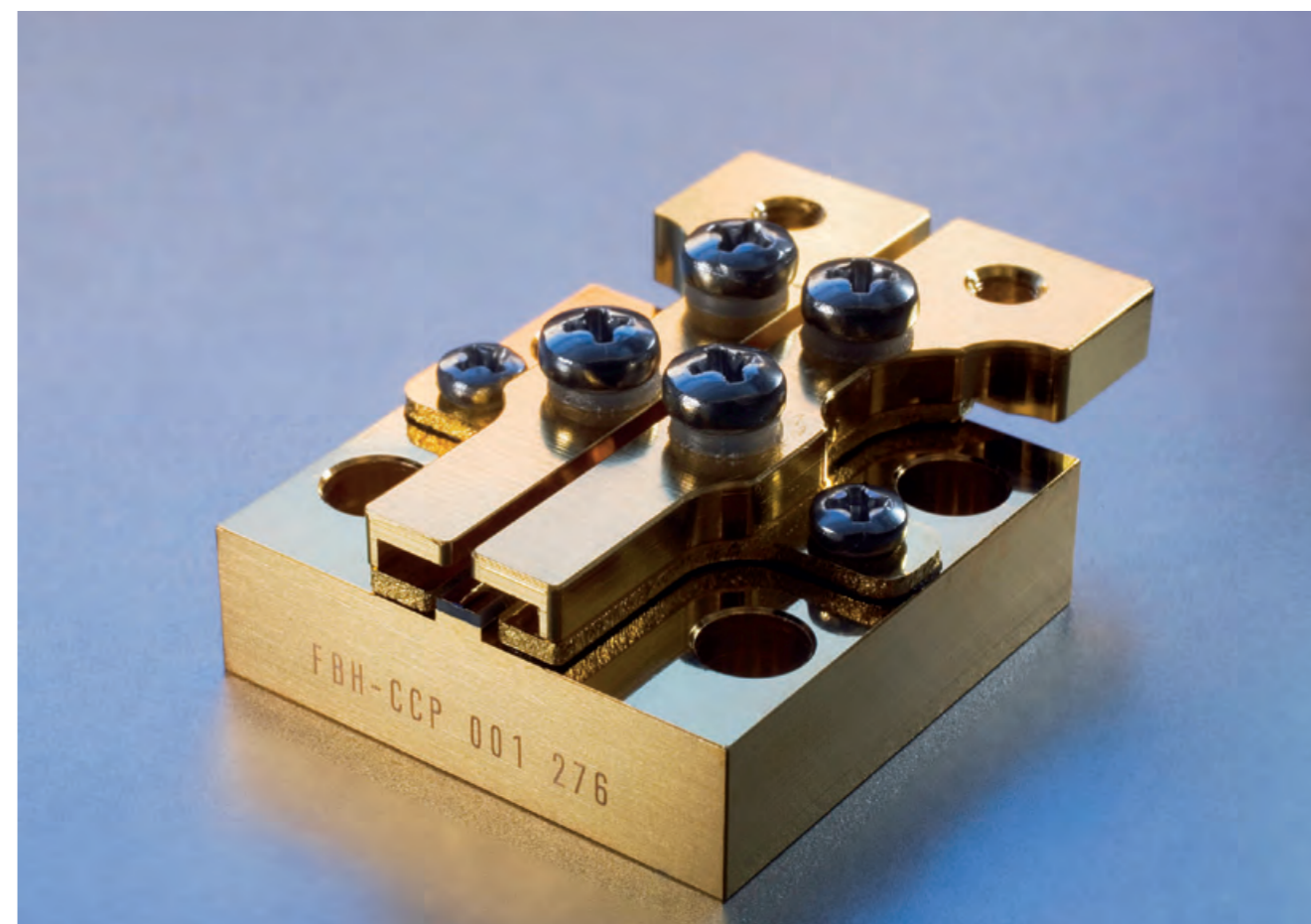
$$\beta = \frac{P}{M_{\parallel}^2 M_{\perp}^2 \lambda^2} \quad \text{Brightness}$$

Hohe Brillanz β_{λ} lässt sich daher mittels einer hohen Leistung P , einer guten räumlichen lateralen und vertikalen Strahlqualität M^2 und einer schmalen spektralen Linienbreite $\Delta\lambda$ erzielen.

High Brilliance and High Output Power: Tapered Laser with Integrated Bragg Grating

The brilliance of high-power diode lasers is a main research focus at the Ferdinand-Braun-Institut. High-brilliance diode lasers enable improved pumping of fiber lasers and solid-state lasers. Further applications are in direct material processing and in frequency conversion for display technology. The brilliance of a laser diode is mathematically defined as:

Therefore, high brilliance β_{λ} can be achieved by a high optical output power P , a good spatial beam quality M^2 in lateral and vertical direction and a small spectral line width $\Delta\lambda$.



Trapezlaser mit integriertem Bragg-Gitter auf CCP-Mount.
Tapered laser with integrated bragg grating on CCP-mount.

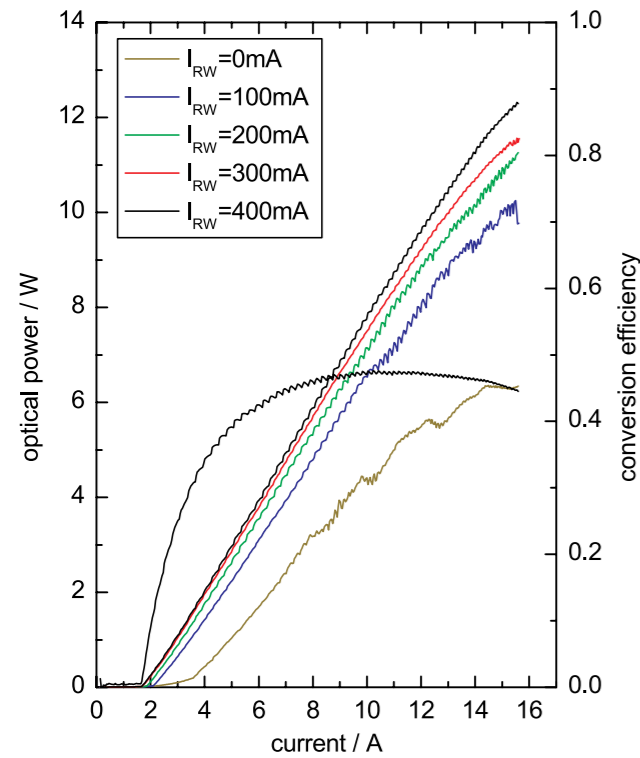


Abb. 1: Optische Ausgangsleistung eines 6 mm DBR-Trapezlasers als Funktion des Stromes durch die Trapezsektion, Parameter ist der Strom durch die RW-Sektion.

Fig. 1: Optical output power vs. tapered current of a 6 mm DBR-tapered diode laser. The current I_{RW} is varied.

Das FBH arbeitet an brillanten Diodenlasern, die die gewünschten Eigenschaften in einem kompakten monolithischen Bauelement vereinen. Diese Trapezlaser mit integriertem Gitter kombinieren die hervorragende Strahlqualität von Rippenwellenleiterlasern (RW) mit der ausgezeichneten Ausgangsleistung eines Breitstreifenlasers. Die schmale spektrale Linienbreite wird durch die Integration eines frequenzselektiven Gitters (DBR - Distributed Bragg Reflector) in die Rippenwellenleitersektion erreicht. Durch eine Optimierung im Design der einzelnen Teilsektionen konnten am FBH hochbrillante DBR-Trapezlaser bei Wellenlängen von 980 nm und 1060 nm mit Spitzenausgangsleistungen von bis zu 12 W erreicht werden.

In Abb. 1 sind die optische Ausgangsleistung, die Spannung und die Konversionseffizienz als Funktion des Trapezstromes I_{TA} und des Rippenwellenleiterstrom I_{RW} für einen 6 mm DBR-Trapez laser abgebildet. In Abb. 2 ist die spektrale Charakteristik für $I_{RW} = 400$ mA als Funktion des Trapezstromes I_{TA} in einer Falschfarbendarstellung zu sehen. Die Übersicht zeigt, dass das integrierte wellenlängenselektive Gitter über den gesamten Leistungsbereich wirkt. Die Emissionswellenlänge variiert temperaturbedingt nur um ca. 0,3 nm. Die eingefügte Abbildung stellt ein optisches Spektrum bei $P = 10$ W beispielhaft dar. Die spektrale Halbwertsbreite liegt bei Werten kleiner 12 pm. Da die Messungen mit einem Spektrenanalysator, der eine Auflösung von ca. 10 pm besitzt, durchgeführt wurden, kann daher davon ausgegangen werden, dass die spektrale

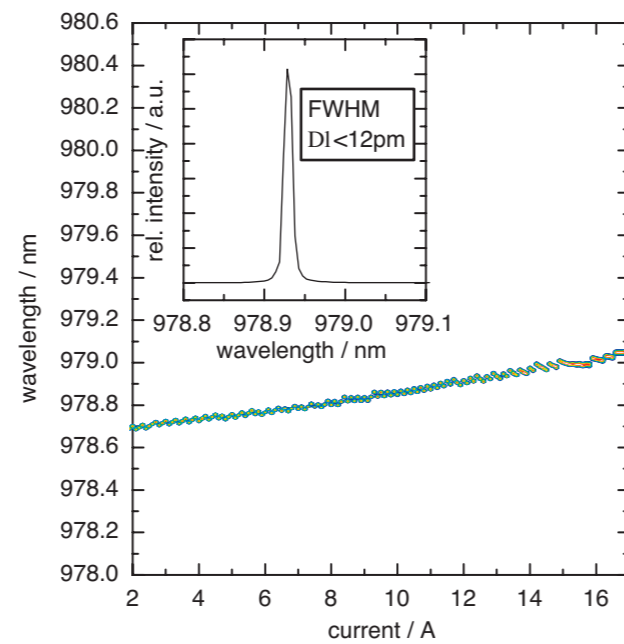


Abb. 2: Falschfarbendarstellung des optischen Spektrums eines DBR-Trapezlasers als Funktion des Trapezstromes. ($I_{RW} = 400$ mA) Eingefügt ist ein optisches Spektrum bei einer Leistung von 10 W.

Fig. 2: False color contour plot of the spectral behavior of a 6 mm DBR-tapered diode laser ($I_{RW} = 400$ mA). Inset: single spectrum at 10 W ($I_{TA} = 12.5$ A).

FBH is working on the development of such brilliant diode lasers that combine all mentioned requirements in one compact monolithic device. One possibility is a tapered diode laser with an internal grating. Such device combines the lateral single-mode operation of a ridge-waveguide (RW) laser providing excellent beam quality with an amplifying tapered area responsible for high output power. The small spectral line width is met by including a frequency selectivity grating (DBR - distributed bragg reflector). By optimizing the design of the several sections of the device, FBH was able to demonstrate highly brilliant DBR-tapered diode lasers at 980 nm and 1060 nm with peak powers up to 12 W.

Fig. 1 shows optical output power, voltage und conversion efficiency of a 6 mm DBR-tapered laser as function of the current through the tapered I_{TA} and the ridge waveguide I_{RW} section. In fig. 2 the spectral behavior versus the taper current for a RW current of $I_{RW} = 400$ mA is illustrated as a false color contour plot. The mapping shows a nearly single-mode operation over the whole range of performance. Due to thermal fluctuation, the emission wavelength increases only about 0.3 nm. The inset in fig. 2 exemplifies the spectrum at $P = 10$ W. The full width of half maximum is $\Delta\lambda < 12$ pm, which is only slightly larger than the monochromator's spectral resolution of 10 pm. Thus, one can expect that the spectral line width is even smaller than 12 pm over the whole operation range.

Linienbreite über den gesamten gemessenen Arbeitsbereich deutlich kleiner als die gemessenen 12 pm ist.

Für die Bestimmung der Strahlqualität wurden die Intensitätsprofile der Strahltaile und des Fernfeldes mit der Methode des bewegten Spaltes ermittelt. Abb. 3 zeigt als Beispiel diese Strahlprofile für die in Abb. 1 dargestellte Kennlinie bei einer Ausgangsleistung von $P = 11,4$ W. Der sich daraus ergebende Strahlqualitätsfaktor beträgt $M^2_{1/e^2} = 1,2$, wobei sich 70% der Ausgangsleistung in der zentralen Strahlkeule befinden.

Mit den erzielten Kenndaten wurden die höchsten jemals veröffentlichten Werte für die spektrale Strahldichte ($\lambda = 980$ nm, $\beta = 1,100$ MW·cm⁻²·sr⁻¹; $\lambda = 1060$ nm, $\beta = 800$ MW·cm⁻²·sr⁻¹) nachgewiesen. Bei der Frequenzkonversion mit PPLN-Volumenkristallen konnten erstmals mithilfe von kantenemittierenden Diodenlasern Ausgangsleistungen von über 1 W im sichtbaren Licht erzielt werden. Die am FBH gefertigten DBR-Trapez laser sind daher bestens für die genannten Anwendungen geeignet. Zukünftige Schwerpunkte der Forschung liegen in der Steigerung der Effizienz und einer weiteren Verbesserung der Brillanz der Diodenlaser.

The beam quality was determined by recording intensity distributions of beam waist and far field, using a moving slit method. Fig. 3 shows these intensity profiles of the device displayed in fig. 1 at an optical output power of $P = 11.4$ W. The resulting beam quality factor is $M^2_{1/e^2} = 1.2$ with 70% of the output power in the main lobe.

In 2008, FBH has demonstrated the highest ever published values for brightness ($\lambda = 980$ nm, $\beta = 1,100$ MW·cm⁻²·sr⁻¹; $\lambda = 1060$ nm, $\beta = 800$ MW·cm⁻²·sr⁻¹). For the first time, an optical output power of more than 1 W has been achieved by using edge-emitting diode lasers for frequency conversion with a bulk PPLN crystal. Therefore, these lasers are ideally suited for the above mentioned applications. Future development aim at increasing efficiency of the devices and further improving brilliance.

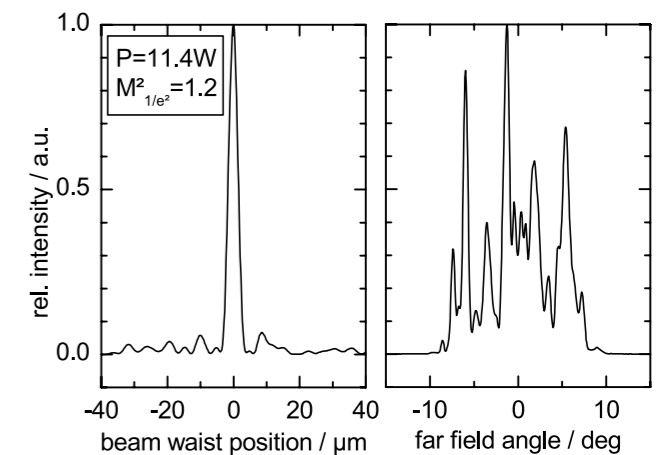


Abb. 3: Intensitätsverteilungen der Strahltaile und des Fernfeldes bei einer optischen Ausgangsleistung von 11,4 W.
Fig. 3: Intensity profiles of beam waist and far field at an optical output power of 11.4 W.

Veröffentlichungen // Publications

C. Fiebig, G. Blume, C. Kaspari, D. Feise, J. Fricke, M. Matalla, W. John, H. Wenzel, K. Paschke and G. Erbert, „12W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser“, *Electronics Letters*, Vol. 44, no. 21, pp. 1253-1255, 2008.

C. Fiebig, G. Blume, M. Uebernickel, D. Feise, C. Kaspari, K. Paschke, J. Fricke, H. Wenzel, and G. Erbert, „High-Power DBR-Tapered Laser at 980 nm for Single-Path Second Harmonic Generation“, *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, submitted and accepted 2008, published Mai 2009.

K.-H. Hasler, B. Sumpf, P. Adamiec, F. Bugge, J. Fricke, P. Ressel, H. Wenzel, G. Erbert, G. Tränkle, „5-W DBR Tapered Lasers Emitting at 1060 nm With a Narrow Spectral Linewidth and a Nearly Diffraction-Limited Beam Quality“, *IEEE Photon. Techn. Lett.*, vol. 20, no. 19, pp. 1648-1650, 2008.

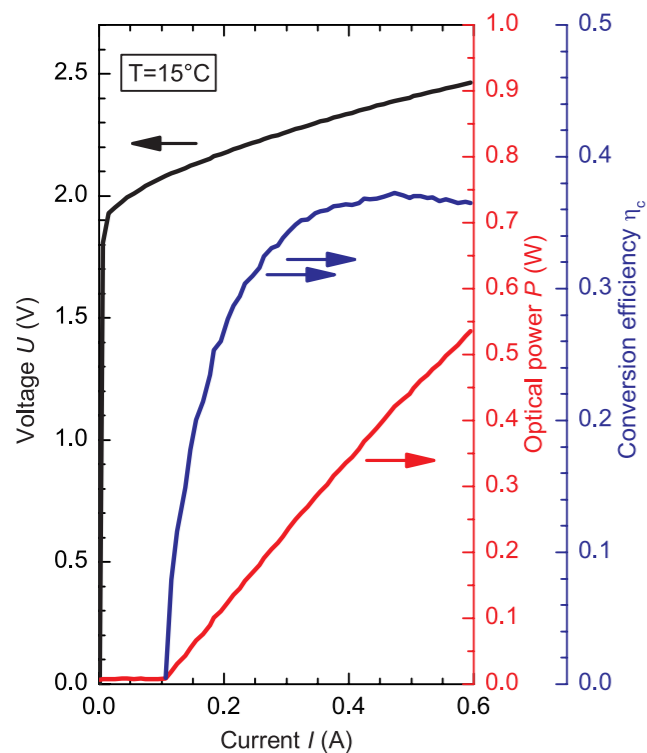
B. Sumpf; K.-H. Hasler; P. Adamiec; F. Bugge; J. Fricke; P. Ressel; H. Wenzel; G. Erbert; G. Tränkle, „1060 nm DBR tapered lasers with 12 W output power and a nearly diffraction limited beam quality“, *Proceedings of SPIE*, Vol. 7230, submitted and accepted 2008, published 2009.

K. Paschke, C. Fiebig, D. Feise, J. Fricke, C. Kaspari, G. Blume, H. Wenzel, and G. Erbert, „High-power single-frequency operation of a DBR tapered laser“, *Proceedings ISLC 2008*, pp. 131-132.

Hocheffizient und vielfältig einsetzbar: Diodenlaser bei 640 nm

Rot emittierende Diodenlaser werden als kompakte Lichtquellen für die Displaytechnologie, die Medizin- und die Messtechnik benötigt. Während Breitstreifen-Diodenlaser im nahen Infrarotbereich Konversionseffizienzen von über 60% erreichen, liegt dieser Wert bei rot emittierenden Lasern im Wellenlängenbereich um 640 nm typischerweise bei 20 - 30%. Die elektrische Leistung wird also zu etwa einem Viertel in Licht und zu etwa drei Vierteln in Wärme umgewandelt, damit sind hohe optische Ausgangsleistungen von vornherein schwer erreichbar. Außerdem bewirkt eine Erwärmung des Laserchips das sogenannte „thermische Überrollen“ der Kennlinie, bei dem die Ausgangsleistung nicht mehr linear mit dem Strom ansteigt.

Um die Konversionseffizienz zu erhöhen, wurde am FBH eine Laserstruktur entwickelt, die bei 15°C und einer Emissionswellenlänge von 637 nm eine Konversionseffizienz von 37% erreicht (Abb. 1). Die maximale Ausgangsleistung im Dauerstrichbetrieb beträgt 0,54 W bei 600 mA. Der elektrisch gepumpte Bereich hat dabei eine Fläche von nur 30 µm x 750 µm. Wie in der Kennlinie zu erkennen ist, nimmt die Leistung auch im oberen Strombereich linear mit dem Strom zu und zeigt kein thermisches Überrollen.



Highly Efficient and Versatile: Diode Lasers at 640 nm

Red emitting diode lasers can be used as compact light sources in display technology, medical technology and analytics. While broad-area diode lasers in the near infrared achieve conversion efficiencies of more than 60%, red emitting diode lasers in the wavelength range around 640 nm only reach typically 20 - 30%. Hence, only one quarter of the electric power is converted into light whereas the remaining three quarters are converted into heat, which a priori limits the optical output power. Moreover, heating of the laser chip causes so-called „thermal rollover“ of the characteristic curve, i.e., the output power does not increase linearly with the input current.

To achieve a higher conversion efficiency, FBH's scientists designed a laser structure that reaches a conversion efficiency of 37% at 15°C and an emission wavelength of 637 nm (fig. 1). The maximum continuous-wave output power is 0.54 W at 600 mA. The electrically pumped area is only 30 µm x 750 µm. As the power-voltage-current characteristics show, the output power increases linearly with current even in the upper current range and shows no thermal rollover.

Abb. 1: Leistungs-Spannungs-Strom-Kennlinie und Konversionseffizienz bei T = 15°C für einen 30 µm x 750 µm-Breitstreifenlaser im Dauerstrichbetrieb.
Fig. 1: Continuous wave power-voltage-current characteristics and conversion efficiency of a 30 µm x 750 µm broad area laser at T = 15°C.

Die Laser werden mit der p-dotierten Seite auf Diamant-Wärmespreizer aufgelötet, um eine gute Wärmeabfuhr aus der aktiven Zone zu gewährleisten. Der Wärmespreizer selbst wird auf einen c-Mount (siehe Abb. 2) gelötet. Mit dieser passiven Kühlung konnte eine Konversionseffizienz von 37% und damit ein Weltbestwert erzielt werden. Das hervorragende Ergebnis beruht insbesondere auf einer Optimierung der Vertikalstruktur. Diese besteht aus einer aktiven Schicht aus InGaP, einem Wellenleiter aus AlGaInP, einer Mantelschicht aus AlInP auf der n-dotierten und einer AlGaAs-Mantelschicht auf der p-dotierten Seite. Die Struktur ist auf Emission unter einem vertikalen Fernfeldwinkel von 30° Halbwertsbreite zugeschnitten.



Abb. 2: Roter Laser auf C-Mount im Betrieb.
Fig. 2: Red laser diode on c-mount in operation.

Um die verfügbare Ausgangsleistung zu erhöhen, wurden aus den Dioden Laserbarren aus 12 Emittlern (jeweils 30 µm x 750 µm) auf Kompositdiamant als Wärmespreizer aufgebaut. Diese Barren erreichen bei T = 15°C und P = 3,9 W eine sehr gute Konversionseffizienz von 31%. Die optische Ausgangsleistung bei einem Strom von 8 A beträgt 5,4 W. Die verminderte Effizienz im Vergleich zum Einzelemittler ist in der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Kompositdiamant-Wärmespreizers begründet. Abb. 3 zeigt, dass diese Laserbarren über 100 bzw. 120 Stunden zuverlässig bei T = 15°C und einer Leistung von 3 W arbeiten.

Veröffentlichungen // Publications

Ch. Kaspari, B. Sumpf, M. Zorn, J. Fricke, P. Ressel, K. Paschke, M. Weyers, G. Erbert, „Conductively Cooled 637-nm InGaP Broad-Area Lasers and Laser Bars With Conversion Efficiencies Up to 37% and a Small Vertical Far Field of 30°“, IEEE Phot. Technol. Lett., Vol. 20, 1824 (2008).

The lasers are soldered p-side down on a diamond heat spreader to allow for good heat transfer away from the active region. The heat spreader is soldered on a c-mount (fig. 2). With this passive cooling configuration, a record conversion efficiency of 37% could be achieved. This outstanding result was accomplished through optimization of the vertical structure, which consists of an InGaP active layer, an AlGaInP waveguide, an AlInP cladding layer on the n-doped side and an AlGaAs cladding layer on the p-doped side. The structure was tailored to emit laser light with a vertical far field angle of 30° full-width half maximum.

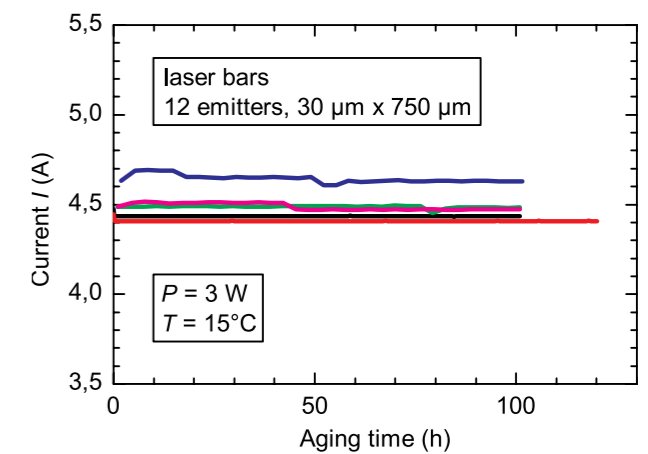


Abb. 3: Alterung von fünf Laserbarren bei T = 15°C im Dauerstrichbetrieb bei einer Ausgangsleistung von 3 W.
Fig. 3: Aging of five laser bars at T = 15°C and a continuous wave output power of 3 W.

To increase the available output power, these laser diodes were assembled to laser bars with 12 emitters (30 µm x 750 µm each) with composite diamond used as heat spreader material. At T = 15°C and P = 3.9 W, the laser bars show a remarkable conversion efficiency of 31%. The optical output power at a current of 8 A is 5.4 W. The reduced conversion efficiency compared to the single emitter is due to lower heat conductivity of the composite diamond heat spreader. Fig. 3 shows reliable operation of these laser bars at T = 15°C and a power of 3 W for 100 and 120 hours, respectively.

Kompakt und effizient: Strahlquelle mit hoher Brillanz (MOPA)

Leistungsstarke Laserquellen im Wellenlängenbereich um 980 nm bzw. 1060 nm sind als Komponenten beim Kunststoff-Schweißen oder Pumpen von Ytterbium- bzw. Erbium-dotierten Faserlasern und Verstärkern nicht mehr wegzudenken. Insbesondere bei der Frequenzverdopplung in der Medizintechnik sind sie unverzichtbar geworden. Sie sollen nicht nur möglichst klein und kompakt sein, sondern das Licht auch mit einer hohen spektralen Strahldichte emittieren.

Das FBH hat effiziente und kompakte Lasermodule mit hohen Ausgangsleistungen, exzellenter Strahlqualität und schmaler spektraler Linienbreite bei relativ schmalen vertikalen Fernfeld von 18° (FWHM) entwickelt. Diese Module bestehen aus einem Master Oszillator (MO) und einem Verstärker (Power Amplifier - PA). Als Master Oszillator kommt ein DFB-Laser zur Erzeugung von Strahlung mit guter Strahlqualität zum Einsatz, der auch als longitudinaler Modenfilter wirkt. Die Verstärkung wird mit einem Trapezverstärker realisiert. Die Koppelung erfolgt über eine GRIN-rod-Linse. Dieses innovative Technologiekonzept ermöglicht sowohl eine hochpräzise als auch stabile Montage. Die maßgeschneiderten Halbleiterchips werden gemeinsam mit der GRIN-rod-Linse auf einer mikro-optischen Bank integriert, wie es in Abb. 1 zu sehen ist. Das Konzept ist leicht auf unterschiedliche Wellenlängen übertragbar.

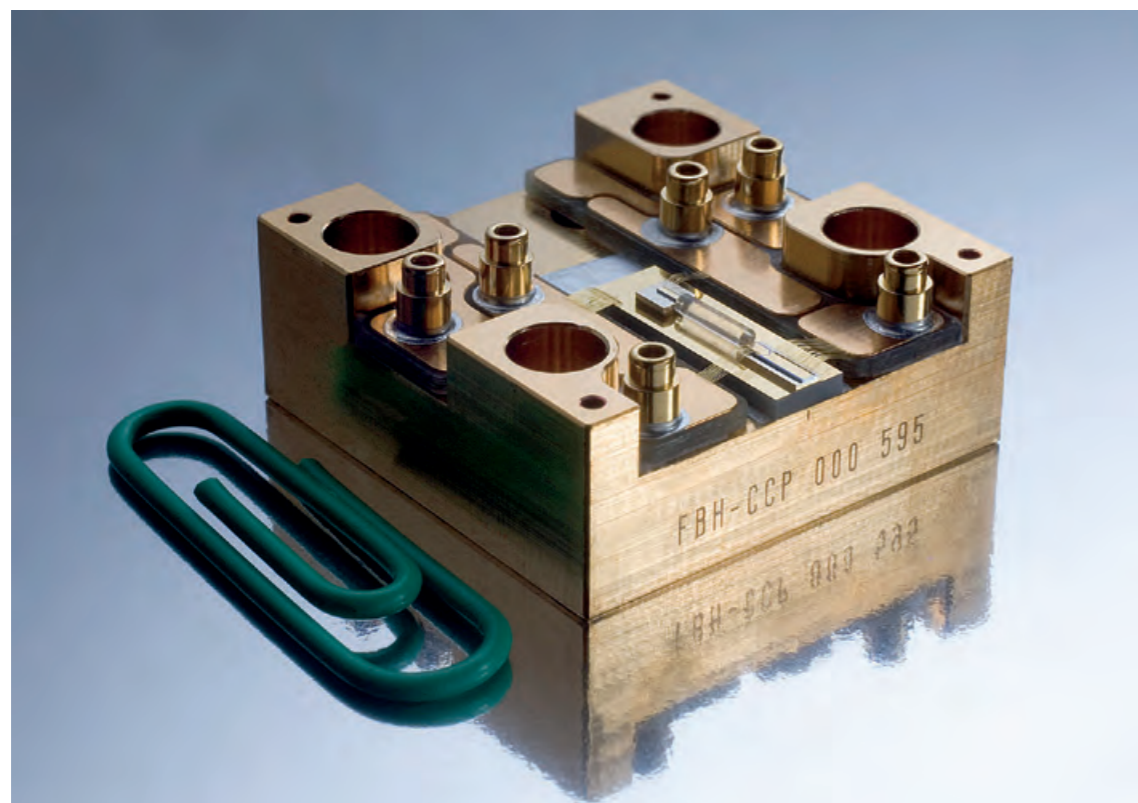


Abb. 1: Master Oszillator Power Amplifier aufgebaut auf einem CCP-Halter.
Fig. 1: Master Oscillator Power Amplifier on a CCP-mount.

Compact and Efficient: Beam Source with High Brilliance (MOPA)

High-power laser sources with respective wavelengths in the range of 980 nm and 1060 nm are used as essential components for plastics welding and pumping of erbium and ytterbium doped fiber lasers and amplifiers. Especially when frequency doubled and used in medical applications, they have become indispensable. For these applications, the devices do not only have to be small and compact but also need light emitting with a high spectral radiance, i.e. brilliance.

The FBH has developed efficient and compact laser modules with high output powers, excellent beam qualities, and small spectral line widths with a relatively small vertical far field of 18° (FWHM). These modules consist of a master oscillator (MO) and a power amplifier (PA). For the MO a distributed feedback (DFB) laser is used to generate radiation providing a good beam quality and functioning as a longitudinal mode filter to obtain the small spectral line width. The amplification is then realized with an amplifier which contains a ridge waveguide (RW) and a tapered region (TPA). The coupling between the respective RWs of the MO and the PA is performed by a GRIN rod lens. This innovative technology allows a very precise and stable assembly. The integration of the specially tailored semiconductor chips and the GRIN rod lens is accomplished on a micro-optical bench, as illustrated in fig. 1. This concept is also applicable for other wavelengths.

In Abb. 2 ist die optische Ausgangsleistung, die Spannung und die Konversionseffizienz als Funktion des Stromes des Trapezteils I_{TPA} bei konstantem Rippenwellenleiterstrom I_{RW} des 4 mm langen Trapezverstärkers und bei konstantem Strom des Master Oszillators I_{MO} für einen MOPA bei 976 nm dargestellt. Es werden optische Ausgangsleistungen größer 4,5 W bei einer nahezu beugungsbegrenzten Strahlung erzielt. Der Strahlqualitätsfaktor in lateraler Richtung beträgt $M^2_{2, \text{MOM}} < 2$, wobei sich 95% der Ausgangsleistung in der zentralen Strahlkeule befinden. Das optische Spektrum wurde bei $P = 4$ W gemessen. Die spektrale Halbwertsbreite liegt bei Werten kleiner 2 pm (auflösungsbegrenzt durch den Spektrenanalysator ELIAS).

Abb. 3 zeigt in einer Falschfarbendarstellung die Wellenlängenstabilität bei 20°C des MOPAs für den gesamten Leistungsbereich aus Abb. 2. Durch die thermische Entkopplung erreicht man eine Wellenlängenstabilität von $1:10^4$. Damit sind solche kompakten Module attraktiv für die genannten Anwendungen, wie beispielsweise die Frequenzverdopplung. Sie könnten auch bald ineffiziente Festkörperlaser oder großformatige Gaslaser ersetzen.

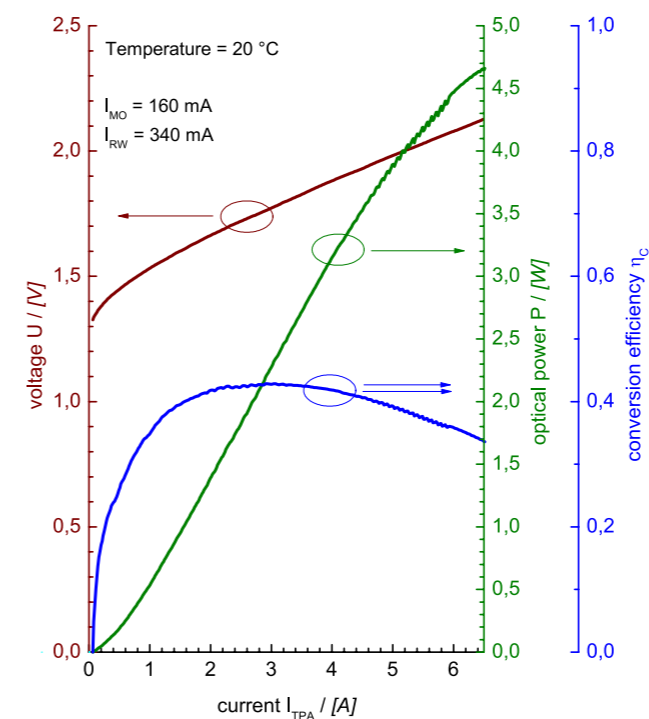


Abb. 2: Typischer Kennlinienverlauf für einen MOPA mit einem 4 mm langen Verstärker bei einer Wellenlänge von 976 nm und einer Temperatur von 20°C.
Fig. 2: Typical characteristic curve of a MOPA with a 4 mm amplifier and a wavelength of 976 nm at 20°C.

In fig. 2 optical output power, voltage and conversion efficiency as a function of current through the TPA (I_{TPA}) is shown for a MOPA at 976 nm. The current driving the RW section (I_{RW}) of the 4 mm long amplifier as well as the current in the MO (I_{MO}) is kept constant. An optical output power up to 4.5 W was achieved while maintaining a diffraction limited beam. The beam propagation factor in lateral direction is $M^2_{2, \text{MOM}} < 2$, while 95% of the output power is in the central lobe. The optical spectrum was measured at 4 W. The spectral half-width is smaller than 2 pm (limited by the resolution of the optical spectrum analyzer ELIAS).

Fig. 3 shows the wavelength stability of the MOPA at 20°C over the whole power range of fig. 2 in a false-color plot. Through thermal decoupling a stability of $1:10^4$ is accomplished. Therefore, these compact modules are highly interesting for the applications mentioned above as well as for frequency doubling. They could also be a replacement for inefficient solid-state lasers and large-sized gas lasers soon.

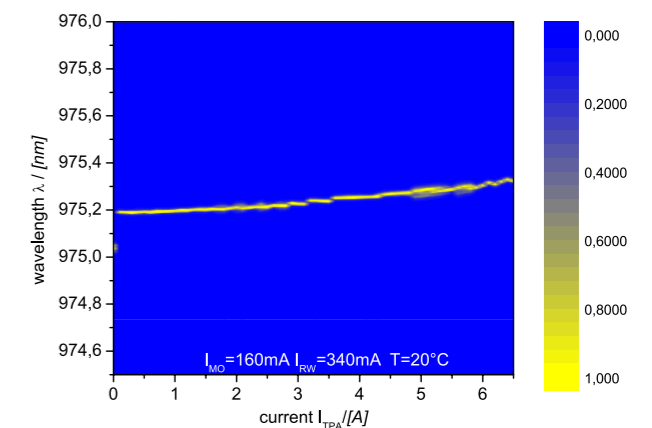


Abb. 3: Wellenlängenstabilität des MOPAs bei 20°C über den gesamten Leistungsbereich aus Abb. 2.
Fig. 3: Wavelength stability of the MOPA at 20°C over the whole power range of fig. 2.

Veröffentlichungen // Publications

A. Sahn, H. Thiem, K. Paschke, J. Fricke, A. Knauer, and G. Erbert, „4.5 W Hybrid Integrated Master-Oscillator Power-Amplifier at 976 nm on Micro-Optical Bench“; Photonics West, San José, California, January 2009. Conference Digest 7221-31.

Kompakte Mikrosystemlichtquelle bei 488 nm für die in-situ Raman-Spektroskopie

Kompakte Laserlichtquellen im blauen Spektralbereich gewinnen immer größere Bedeutung für die optische Sensorik im Bereich der Bioanalytik, Lebensmittelüberwachung und Medizin. Am FBH werden mithilfe der Mikrosystemtechnik Laserlichtquellen mit einer Emissionswellenlänge von 488 nm entwickelt. Diese Wellenlänge ist in der Raman-Spektroskopie seit Jahren durch den Einsatz von Argon-Ionen-Lasern etabliert. Deren Größe und Effizienzen lassen jedoch einen Einsatz in akkubetriebenen Handgeräten nicht zu, Halbleiterlaser-basierte Lichtquellen sind hier die Alternative.

Eine Methode zur Realisierung effizienter Lichtquellen im blauen Spektralbereich ist die Frequenzverdopplung (Second Harmonic Generation, SHG). Das Licht eines im nahen Infraroten emittierenden Halbleiterlasers wird in einen für die SHG geeigneten Kristall eingekoppelt. Dabei wird ein Teil der Pumpstrahlung in Licht der halben Wellenlänge konvertiert.

Das hier vorgestellte Konzept benutzt als Pumplaser einen Distributed Feedback (DFB) Ridge Waveguide (RW) Laser mit einer Wellenlänge von 976 nm und einem internen Gitter zur Wellenlängenstabilisierung. Der SHG-Kristall aus periodisch gepoltem Lithium-Niobat (PPLN) mit einem Rippenwellenleiter steigert die optische Umsetzrate. Das Pumplicht wird mit vier Mikrooptiken in die $3 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ große Apertur des SHG-Wellenleiters eingekoppelt. Zwei weitere Mikrooptiken formen das blaue Licht am Austritt. Alle Komponenten sind auf einer Mikrobank mit einer Grundfläche von $25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ aufgebaut und fixiert (siehe Abb. 1). Die Vorauswahl geeigneter DFB-RW-Laser und SHG-Kristalle ermöglicht deren gemeinsame Temperierung auf der Mikrobank. Für eine effiziente Frequenzkonversion muss bei einer gewählten Betriebstemperatur des Moduls (z. B. 25°C) die Emissionswellenlänge des Pumplasers mit

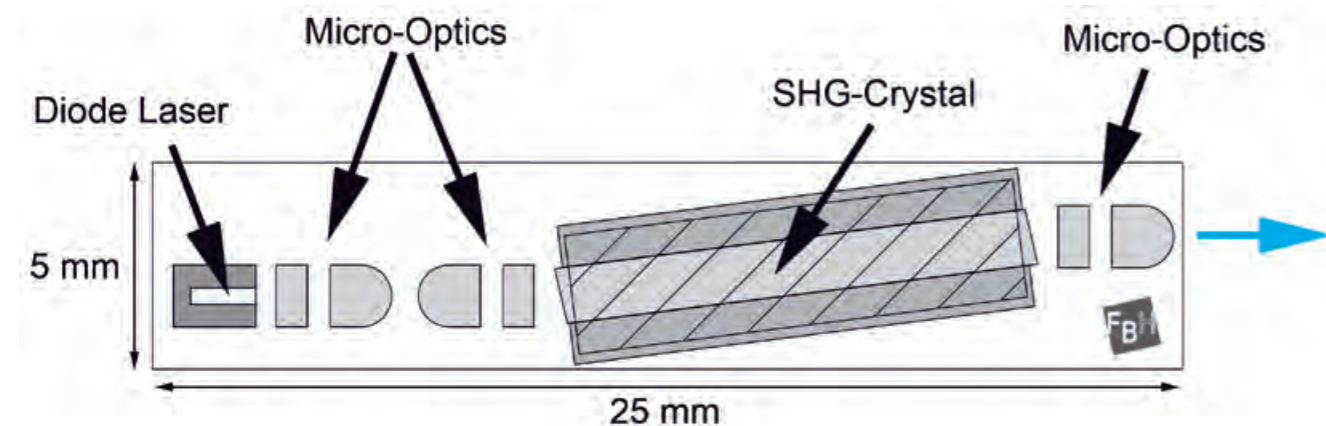


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer SHG-Mikrosystemlichtquelle bei 488 nm.
Fig. 1: Scheme of the SHG microsystem light source at 488 nm.

Compact Microsystem Light Source at 488 nm for in situ Raman Spectroscopy

Compact light sources emitting in the blue spectral range become more and more important for sensoric applications, in e.g. bioanalytics, food safety control, and medical diagnostics. At the FBH laser light sources are developed with an emission wavelength at 488 nm. This excitation wavelength is well established for Raman spectroscopy using argon ion lasers for years. As dimension and power consumption of these gas lasers do not allow an integration in e.g. battery-driven handheld systems, semiconductor-based light sources open up an attractive alternative.

A method to realize efficient light sources emitting in the blue spectral range is non-linear frequency conversion by frequency doubling (second harmonic generation, SHG). Light of a semiconductor laser emitting in the near infrared is coupled into a crystal for SHG. One part of this pump light will be converted into light of half the wavelength. A distributed feedback (DFB) ridge waveguide (RW) laser with an internal grating for wavelength stabilization and an emission wavelength at 976 nm is used in this concept.

The SHG crystal consists of periodically poled lithium niobate (PPLN) with a ridge waveguide structure to improve conversion efficiency. A scheme of the laser module is presented in fig. 1. The pump light of the DFB-RW laser is coupled into an aperture of $3 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ of the SHG waveguide using four micro-optical elements. Two additional micro optics collimate the generated blue light for certain applications. All components are fixed on a micro-bench with a footprint of $25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. A preselection of suitable DFB-RW lasers and the SHG crystals provide a combined temperature management on the micro-bench. For efficient frequency conversion, the emission wavelength of the pump laser must be within the spectral acceptance of the SHG crystal at one operating temperature (e.g. 25°C).

der Akzeptanzwellenlänge des SHG-Kristalls übereinstimmen. Die spektrale Verschiebung beider Wellenlängen mit der Temperatur ist nahezu gleich. Dies verbessert die Temperaturstabilität des Lasermoduls und vereinfacht den Aufbau durch den Verzicht auf zusätzliche Komponenten. Für die Experimente wurde die Mikrobank auf einen Conduction Cooled Package (CCP) Halter mit einer Grundfläche von $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ montiert (Abb. 2).

Bei einer vom Halbleiterlaser bei 976 nm emittierten optischen Leistung von ca. 200 mW lassen sich damit mehr als 50 mW blaues Licht im Dauerstrichbetrieb generieren (Abb. 3). Dies erfüllt die Anforderung für die meisten der oben genannten sensorischen Messaufgaben.

Schwankungen in der Leistung liegen über einen Messzeitraum von 180 Sekunden bei unter 1%. Mit einer spektralen Breite der Emission von kleiner 10 pm bei 488 nm ist diese Lichtquelle ideal geeignet für die Raman-Spektroskopie. Das Licht der Seitenmoden des DFB-RW-Lasers liegt außerhalb der spektralen Akzeptanz der Frequenzkonversion und wird in der SHG zusätzlich unterdrückt. Dies bietet die Chance, auf einen Laser-Bandpassfilter in Raman-spektroskopischen Messaufbauten zu verzichten. Umsetzungsraten von über 25% mit einer elektrischen Gesamtleistung des Lasers von unter 1 Watt bieten erstmals die Möglichkeit zur Integration einer wellenlängenstabilisierten 488 nm Laserlichtquelle in batteriebetriebene mobile Messsysteme. Gemeinsame Messungen mit dieser Lichtquelle am Institut für Optik und atomare Physik der Technischen Universität Berlin zeigen ihre gute Eignung für die in-situ Raman-Spektroskopie.

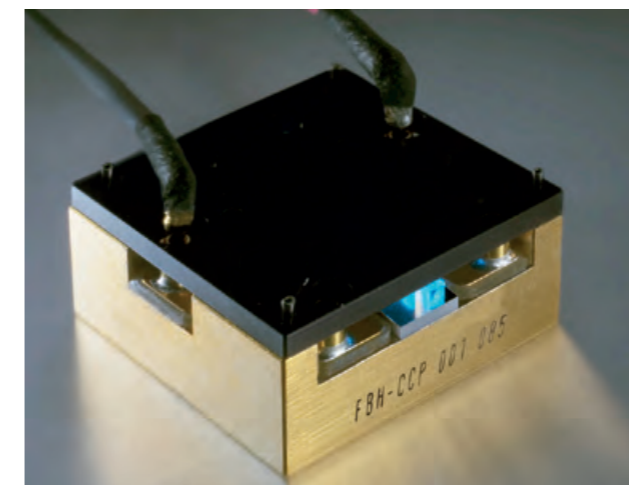


Abb. 2: SHG-Mikrosystemlichtquelle auf CCP-Halter.
Fig. 2: SHG microsystem light source on CCP-mount.

The spectral shift of both wavelengths by temperature is nearly the same. This improves temperature stability of the laser module and simplifies its setup by reducing elements. For the experiments the micro-bench was mounted on a conduction cooled package (CCP) with a footprint of $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (fig. 2).

An optical output power of more than 50 mW blue light has been generated with an optical pump power of 200 mW at 976 nm of a diode laser (fig. 3), which is suitable for most of the above mentioned sensor technology applications.

The optical power was measured with variations below 1% over a measurement time of 180 s. Together with a spectral width below 10 pm at 488 nm, this light source is well suited as excitation light source for Raman spectroscopy. The pump light beyond spectral acceptance of frequency conversion is additionally suppressed by SHG. This provides the opportunity for Raman spectroscopic setups without requiring a laser bandpass filter. A conversion efficiency of more than 25% with an electric power consumption below 1 W enables integration of a wavelength stabilized light source at 488 nm in battery-driven mobile sensor systems. Joint experiments with this laser module at the Department of Optics and Atomic Physics of Technische Universität Berlin demonstrate the eligibility of such light source for in situ Raman spectroscopy.

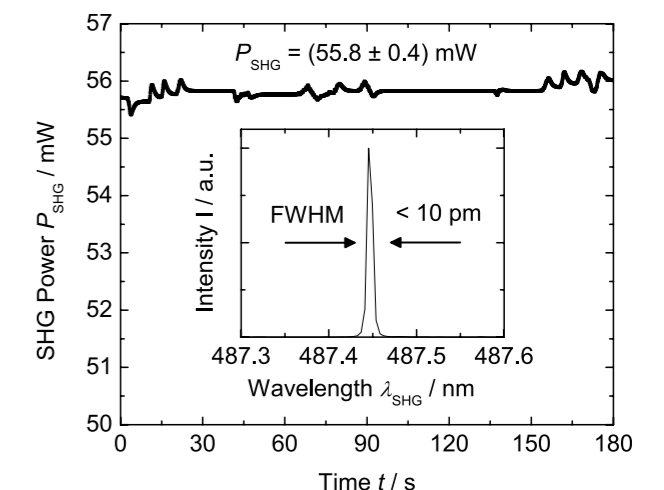


Abb. 3: Leistungseigenschaften, Stabilität und optisches Spektrum der SHG-Mikrosystemlichtquelle bei 488 nm.
Fig. 3: Optical power, stability, and optical spectrum of the SHG microsystem light source at 488 nm.

Veröffentlichungen // Publications

M. Maiwald, D. Jedrzejczyk, A. Sahm, K. Paschke, R. Güther, B. Sumpf, G. Erbert, and G. Tränkle, „Second-harmonic-generation microsystem lightsource at 488 nm for Raman spectroscopy“, *Optics Letters*, Vol. 34, No. 2, accepted in 2008, published January 2009.

Auf zu neuen Dimensionen: Lasermetrologie am FBH

Kann man den Abstand zwischen der Sonne und der Erde auf Haaresbreite genau bestimmen? Im Prinzip ja, aber

Um solche oder ähnliche fundamentalphysikalische Fragestellungen zu bearbeiten, wurde im Jahr 2008 am Ferdinand-Braun-Institut die Gruppe Lasermetrologie etabliert. Diese Arbeitsgruppe entwickelt jene Lasertechnologie, die u. a. zur Beantwortung derartiger Herausforderungen benötigt wird. Die optische Metrologie hat sich in den letzten 5 bis 10 Jahren im Hinblick auf Messgenauigkeit zu dem über alle technologischen Disziplinen führenden Arbeitsfeld entwickelt. Damit lassen sich physikalische Größen mithilfe von laseroptischen Verfahren höchstgenau bestimmen: Verschiebungen atomarer oder molekularer Frequenzen (Energien) von nur einem Teil in 10^{18} können inzwischen nachgewiesen werden, Signale bzw. Strahlung vom Radiofrequenz-Bereich (10^6 Hz, also 1 MHz) bis in den optischen Bereich (einige 10^{15} Hz, also einige 100 THz) werden mit einer Genauigkeit von besser als 1 Teil in 10^{15} synthetisiert. Seit etwa zwei Jahren können Zeit und Frequenz laseroptisch sogar mit einer höheren Genauigkeit gemessen und verglichen werden, als es die Definition der Zeiteinheit Sekunde mit Hilfe der offiziellen Mikrowellenstandards eigentlich erlaubt. Zeit- und Frequenzmessungen mit Hilfe laseroptischer Verfahren sind damit die genauesten Messungen, die der Mensch durchführen kann. Um nun die einleitende Frage zu beantworten: die Bestimmung des Abstandes zwischen Erde und Sonne (150×10^9 m) auf Haaresbreite (10^{-4} m) entspricht einer relativen Genauigkeit von etwa 1 Teil in 10^{15} - eine Genauigkeit, die im Prinzip erreichbar wäre, wenn Sonne und Erde sich wie atomare, also quantenmechanische Objekte verhalten würden...

Die optische Metrologie ist damit an einem Punkt angekommen, an dem die Erde u. a. wegen der existierenden zivilisatorischen und natürlichen Störungen (z. B. Seismik) kein geeignetes Laboratorium mehr darstellt, so dass ein Ausweichen auf weltraumgestützte Einsatzorte unausweichlich ist. Die heute verfügbaren höchststabilen Lasersysteme sind opto-mechanisch und lasertechnologisch hochkomplexe Systeme. Sie sind nicht kompakt (~ 100 dm³ Volumenbedarf), sie sind relativ teuer (einige 100 k€) und ihre Komplexität und mechanische Störanfälligkeit erlauben den Einsatz im Weltraum nicht oder zumindest nur bedingt.

Die Arbeitsgruppe Lasermetrologie

Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik und die Humboldt Universität zu Berlin, Arbeitsgruppe Prof. Peters, haben daher eine gemeinsam betriebene Gruppe Lasermetrologie am FBH gegründet, mit der sie ihre Aktivitäten im Bereich der Entwicklung und des Einsatzes hochkompakter Lasersysteme für die optische

Heading for New Horizons: Laser Metrology at the FBH

Is it possible to determine the distance between Earth and Sun to the breadth of a hair? It is, in principle, but ...

In 2008, the Laser Metrology Group was established at FBH to help addressing questions that are focusing on fundamental physics topics. The Laser Metrology Group will contribute to this kind of fundamental research by developing unique lasers that are a prerequisite for ultra-high precision laser-based measurements. During the past 5 to 10 years laser metrology became the leading technology field in terms of measurement sensitivity and accuracy. By means of laser-based experiments the modification of atomic or molecular energies can meanwhile be determined with a sensitivity of up to 1 part in 10^{18} and electromagnetic fields from radio-frequencies (10^6 Hz, MHz) to the optical domain (some 10^{14} Hz, thus some hundred THz) can be synthesized with a frequency accuracy and stability that is significantly better than 1 part in 10^{15} . Nowadays, frequencies can be measured with laser metrology tools with an accuracy that can not even be provided by the microwave time and frequency standards (microwave „atomic clocks“), which are officially defining the unit of time. Time and frequency measurements based on laser metrology therefore provide the most precise and accurate laboratory measurements humans can perform. Answering the introductory question: measuring the distance between Sun and Earth (150×10^9 m) to the breadth of a hair (10^{-4} m) corresponds to a relative accuracy of 1 part in 10^{15} - an accuracy that could be reached with laser metrology tools if the Sun and the Earth behaved like atomic, i.e. quantum mechanical objects...

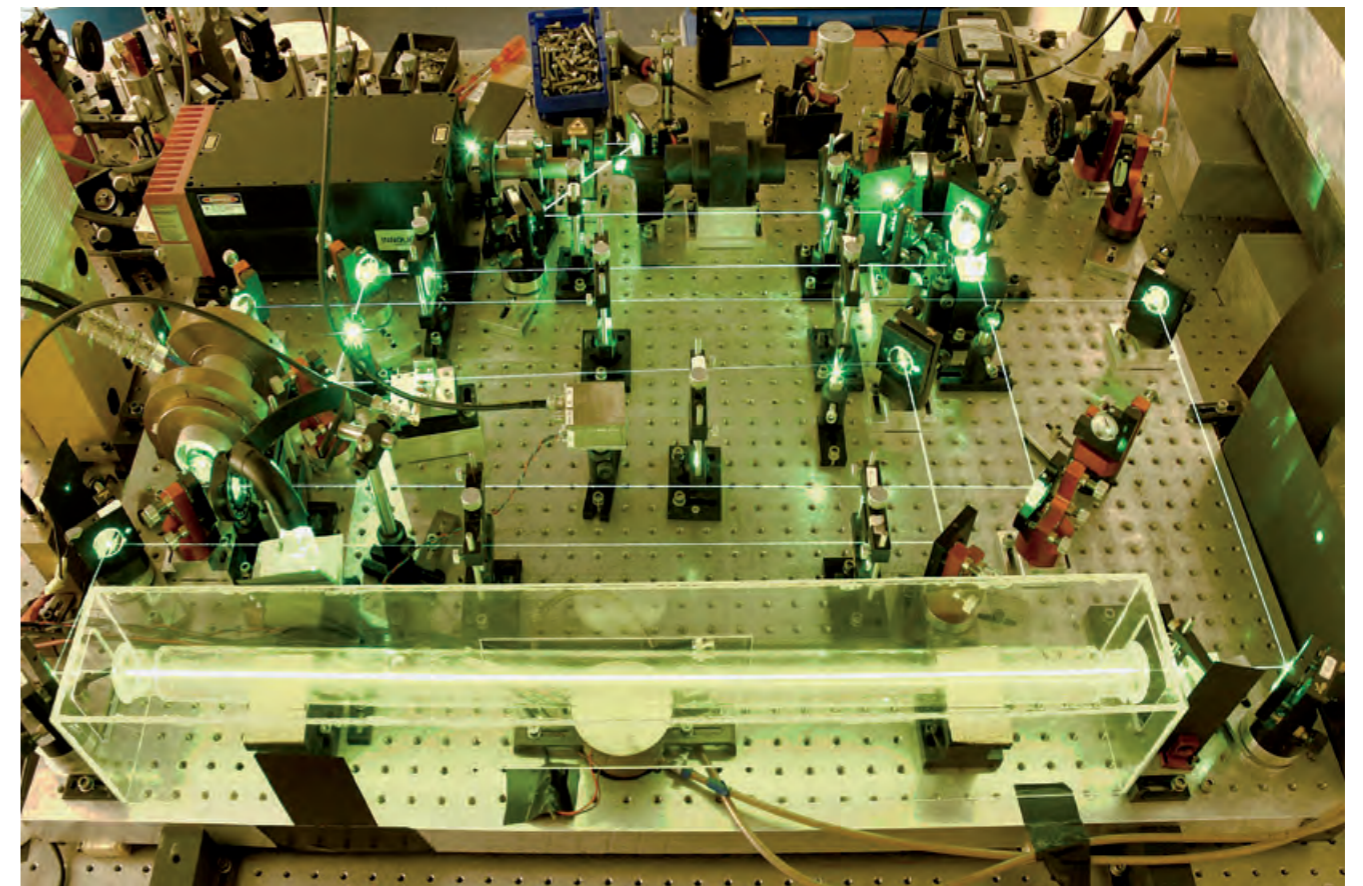
Laser metrology has reached a point where its full potential can only be exploited in space, in part because space can provide a much more „untroubled“ environment than the earth: no gravitational acceleration, no seismic disturbance, and no human-made electronic interference, to name a few bonuses a spaceborne application offers. Today's most stable laser systems are highly complex devices from the opto-mechanics and laser technology point of view. They are big-sized (~ 100 dm³, ranging from a few kg to a few 10 kg) and expensive (some 100,000 €), and their complexity and susceptibility to mechanical disturbances do not actually allow their transfer to and operation in space.

The Laser Metrology Group

In 2008, the Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik and the work group of Prof. Peters, Humboldt-Universität zu Berlin (HUB), therefore established a jointly operated group at the FBH. Long-term goal of this cooperation is the development of highly compact and robust micro-optically integrated laser systems that are based

Metrologie vernetzen. Langfristiges technologisches Ziel dieser Kooperation ist die Bereitstellung von hochstabilen Frequenzkämmen, cw- und Pulslasersystemen, die mikrooptisch integriert sind und wegen ihrer Kompaktheit und Zuverlässigkeit nicht nur für Weltraumanwendungen, sondern auch für andere Anwendungen interessant sind. Durch die Zusammenarbeit können die gemeinsamen Interessen und komplementären Expertisen von FBH (Halbleiterlaserentwicklung) und AG Prof. Peters (optische Präzisionsmessungen für fundamentalphysikalische Fragestellungen) optimal gebündelt werden. Die aus fundamentalphysikalischen Fragestellungen resultierenden Anwendungen stellen höchste Anforderungen an Diodenlasersysteme im Hinblick z. B. auf die Laserleistung, die Frequenzstabilität, die Strahlqualität, die Kompaktheit und die Systemzuverlässigkeit. Fundamentalphysikalische Fragestellungen übernehmen daher die Rolle eines Technologietreibers bei der Entwicklung von Diodenlasersystemen. Umgekehrt profitieren fundamentalphysikalisch orientierte Experimente von den Möglichkeiten, die sich im Rahmen der Vernetzung für die Entwicklung maßgeschneiderter Diodenlasersysteme ergeben.

on semiconductor technology and specifically suited for ultra-high precision measurements in space. The collaboration provides the framework to combine the expertise of both partners - semiconductor laser development at FBH and laser-based precision measurements at HUB - to foster the development of laser systems for laser metrology. Laser metrology applications make high demands on laser performance, specifically on optical output power, power and frequency stability, beam quality, compactness, and reliability. Fundamental physics driven applications therefore play the role of a technology driver for the development of semiconductor-based lasers. In turn, fundamental physics experiments benefit from the progress made on laser development as well as from the fact, that semiconductor lasers can be tailored for specific applications.



Jod-basierter Frequenzstandard der Arbeitsgruppe Prof. Peters der Humboldt-Universität. Am FBH sollen in den nächsten Jahren komplexe Lasersysteme für die optische Metrologie soweit mikrooptisch integriert werden, dass sie auch im Weltraum eingesetzt werden können. Iodine-stabilized frequency standard of Prof. Peters' group at the Humboldt-Universität zu Berlin. At FBH, complex laser systems for optical metrology are being miniaturized and optimized specifically for space-based applications.

Zu den Arbeitsfeldern der Gruppe Lasermetrologie gehören:

- Entwicklung schmalbandiger und ultra-schmalbandiger Dauerstrich-Diodenlasersysteme für die optische Präzisionsspektroskopie, z. B. für Atomuhren
- Entwicklung von höchststabilen, modengekoppelten Ultrakurzpuls-Diodenlasersystemen für die optische Metrologie
- Mikrooptische Integration auch komplexer Diodenlasersysteme für die optische Metrologie. Hier kann die Gruppe Lasermetrologie auf Know-how der Gruppe Hybride Lasersysteme aufbauen
- Entwicklung von Lasersystemen für die optische Kommunikation im Weltraum und für weltraumgestützte Experimente zu fundamentalphysikalischen Fragestellungen
- Lasermess- und Regeltechnik: Entwicklung von elektrooptischen Systemen zur Frequenz- und Leistungsstabilisierung von Diodenlasersystemen sowie für die Charakterisierung deren optischer Eigenschaften (z. B. Linienbreite, Frequenz- und Leistungsstabilität)

Projektbeispiel: LASUS

Die Gruppe Lasermetrologie beteiligt sich an von der Deutschen Luft- und Raumfahrt-Agentur (DLR) geförderten Projekten zur Entwicklung spezieller Lasersysteme für die Untersuchung fundamentalphysikalischer Fragestellungen.

Ab April 2009 sollen im Rahmen des Projektes LASUS (neuartige Diodenlasersysteme für Präzisionsexperimente unter Schwerelosigkeit) Lasersysteme entwickelt werden, die den Test des Äquivalenzprinzips mithilfe quantenmechanischer „Sensoren“ gestattet. Dazu werden gleichzeitig kleine Wolken μK -kalter Rubidium und Kalium-Atome in einer Freifallkapsel des Zentrums für Angewandte Raumfahrt-technik und Mikrogravitation (ZARM) präpariert. Während des mehrere Sekunden andauernden gemeinsamen freien Falls wird dann laserspektroskopisch mit hoher Genauigkeit bestimmt, ob die beiden atomaren Ensembles „gleich schnell“ fallen oder ob sie relativ zueinander beschleunigt werden. Letzteres würde eine Verletzung des Äquivalenzprinzips bedeuten und damit eine Revolution im Gebäude der Allgemeinen Relativitätstheorie und Gravitation auslösen.

Für dieses Experiment werden Diodenlaser für die ultrahochauflösende Spektroskopie von Rubidium (780 nm) und Kalium (767 nm) benötigt. Die Gruppe Lasermetrologie wird hier zwei komplementäre Ansätze für die Realisierung solcher Systeme nutzen. Zum einen werden schmalbandige DFB-Diodenlaser für diese Wellenlängen realisiert. Da zu befürchten steht, dass diese Laser wegen des spektral relativ breitbandigen Frequenzrauschens nicht für alle Teilaufgaben des Projektes eingesetzt werden können, sollen parallel mikrooptisch integrierte „external

The work of the Laser Metrology Group addresses topics within following fields:

- Development of narrow linewidth cw diode lasers for precision laser spectroscopy, e.g. for atomic clocks
- Development of highly stable mode-locked diode lasers for optical metrology
- Micro-optical integration of complex diode laser systems for optical metrology. These activities can benefit from know-how developed by the Hybrid Laser Systems Group at FBH
- Development of diode laser systems for space-based communication and for space-based experiments on fundamental physics topics
- Laser measurement and control: development of electro-optical systems for frequency and power stabilization of diode lasers as well as for the characterization of their optical properties (laser linewidth, frequency and power stability, ...)

Looking into Projects: LASUS

The Laser Metrology Group is cooperating with partners on fundamental physics projects that are funded through the German space agency DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

Starting April 2009, the Laser Metrology Group together with the Universities of Hannover and Hamburg will develop diode laser systems for a quantum sensor-based test of the equivalence principle under micro-gravity conditions. For this experiment, small „clouds“ of rubidium and potassium atoms are created at μK temperatures within an experimental setup that is integrated into a drop capsule of the drop tower located at the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM) in Bremen. During the four seconds of free fall, laser spectroscopic experiments will search for a tiny differential acceleration between the two atomic clouds. According to the currently accepted physical model of our world the two clouds should undergo an identical acceleration. However, theorists speculate about a violation of the equivalence principle when trying to resolve inconsistencies related to the currently accepted model of the world. Finding a non-zero differential acceleration would therefore initiate a paradigm shift in our understanding of the world.

This experiment requires diode lasers for ultra-high resolution spectroscopy at rubidium (780 nm) and potassium (767 nm) wavelengths. The Laser Metrology Group will pursue two approaches to realize these laser systems. The first approach relies on narrow-linewidth distributed-feedback (DFB) lasers. As the broadband frequency noise of these lasers characteristically is hard to control, a second ap-

proach provides an alternative: micro-integrated external cavity diode lasers (ECDLs) entwickelt werden. Bei diesen Systemen kommen externe frequenzselektive Elemente zur Wellenlängenselektion und Linienbreitenreduktion zum Einsatz.

Beim Test des Äquivalenzprinzips kommt es entscheidend darauf an, eine potenzielle Verschiebung der atomaren Niveaus von Rubidium relativ zu denen von Kalium mit einer Genauigkeit von etwa 1 Hz zu bestimmen. Für die Messung solcher relativen Frequenzverschiebungen soll im Rahmen von LASUS ein passiv modengekoppeltes Kurzpuls-Diodenlasersystem entwickelt werden, das Pulse mit einer Repetitionsrate von etwa 6,8 GHz (die Frequenz des Rubidium-Hyperfeinstruktur-Resonanzübergangs) und einer spektralen Bandbreite von > 13 nm emittiert.

proach provides an alternative: micro-integrated external cavity diode lasers (ECDLs) that utilize externally mounted frequency selective components like optical gratings typically provide better frequency stability.

A significant test of the equivalence principle requires an extremely high spectroscopic sensitivity: the relative shift of the atomic levels of rubidium with respect to those of potassium has to be determined with a sensitivity of about 1 Hz, which corresponds to about 1 part in 10^{15} of the atomic energy. For the measurement of these relative energy shifts passively mode-locked diode laser systems will be developed that coherently bridge the spectral gap between 780 nm and 767 nm.

GAN-OPTOELEKTRONIK
GAN OPTOELECTRONICS

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

GaN-Optoelektronik

Im Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik gilt das Hauptaugenmerk der Entwicklung innovativer Lichtquellen auf der Basis von Gruppe-III-Nitriden. Dabei ist es möglich mit dem Materialsystem AlN-GaN-InN einen extrem breiten Wellenlängenbereich abzudecken. Dieser umfasst das komplette sichtbare Wellenlängenspektrum und reicht vom fernen Ultraviolett (UV) bis ins nahe Infrarot. Derzeit konzentrieren sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf drei Hauptgebiete: die Entwicklung und Realisierung von GaN-basierten Hochleistungslasern, Laserdioden im blauen und grünen Spektralbereich sowie von Leuchtdioden (LEDs) im nahen und fernen UV. Diese Lichtquellen eignen sich für die verschiedensten Einsatzbereiche. So sollen LEDs im fernen UV künftig zur Wasserdesinfektion eingesetzt werden. Blaue und grüne Laser können in der Displaytechnologie und Hochleistungslaser für Anwendungen im „Rapid Prototyping“ genutzt werden.

Die Forschungsarbeiten im Bereich GaN-Optoelektronik reichen von der Modellierung und Simulation von GaN-Bauelementen, der Metallorganischen Gasphasen-Epitaxie (MOVPE) von InAlGaN-Materialien bis hin zur Entwicklung von Bauelement-Prozessen und der Charakterisierung von Laserdioden und LEDs. Diese Aktivitäten führt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Experimentelle Nanophysik und Photonik der Technischen Universität Berlin durch. Ziel des FBH ist es, aus dieser engen Verbindung von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung, ein europäisches Kompetenzzentrum für die GaN-Optoelektronik aufzubauen.

Im vergangenen Jahr ist es dem FBH gelungen, die Technologien zum GaN-Wachstum und zur Herstellung von Bauelementen weiterzuentwickeln. Zu den Highlights gehören die Entwicklung GaN-basierter Diodenlaser im Wellenlängenbereich um 400 nm mit Lichtausgangsleistungen von mehr als 500 mW und die Realisierung von optisch gepumpten Lasern mit Emissionswellenlängen bis 445 nm. Bei den ultravioletten Lichtquellen konnten inzwischen LEDs im nahen UV mit Ausgangsleistungen von etwa 6 mW realisiert werden. Im Rahmen des neu gestarteten BMBF-Verbundprojektes „Deep UV LEDs“ und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Materialtechnologie wurden außerdem erste LEDs im UVB-Wellenlängenbereich nahe 320 nm realisiert. Zudem wurden verschiedene neue Projekte initiiert, wie beispielsweise die Entwicklung hochbrillanter grüner Laserdioden im neu gegründeten Sonderforschungsbereich (Sfb) 787.

GaN Optoelectronics

The research activities in the GaN Optoelectronics Business Area are focusing on the development of innovative light emitters based on group III-nitride compound semiconductors. The AlN-GaN-InN material system covers an extremely wide wavelength range reaching from the deep ultraviolet (UV) to the near infrared including the entire visible spectrum. FBH's R&D efforts in this field are currently concentrating on three key areas: Realization of GaN-based high-power lasers, development of laser diodes for emission in the blue and green spectral region and light emitting diodes (LEDs) in the near and deep UV. These devices find applications in various fields, e.g. deep UV LEDs for water purification, blue and green lasers for projection displays and high-power lasers for rapid prototyping.

The research activities within GaN optoelectronics include modeling and simulation of light emitting devices, metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE) of InAlGaN heterostructures, as well as the development of device fabrication processes and characterization of laser diodes and LEDs. These activities are conducted in close collaboration with the Experimental Nanophysics and Photonics group at the Technische Universität Berlin. By connecting competencies in both fundamental and applied research, FBH's activities aim at establishing a center of excellence in GaN optoelectronics within Europe.

In the past year, FBH was able to further advance GaN growth technologies and device fabrication processes. Recent highlights include the realization of GaN-based diode lasers in the 405 nm wavelength range with more than 500 mW output power and the demonstration of optically pumped blue lasers with an emission wavelength of 445 nm. In the area of UV light emitters the research activities have yielded near UV LEDs with a light output of about 6 mW. As part of the newly funded BMBF project „Deep UV LEDs“ and in close collaboration with the Materials Technology Department first LEDs in the UV-B range near 320 nm were demonstrated. Furthermore, a number of new projects have started including the development of high-brilliance green laser diodes within the Collaborative Research Center (Sonderforschungsbereich - Sfb) 787.

Perfekte Schichten für blaue Laserdioden: Epitaxie von InGaN-Quantenfilmen

Blaue halbleiterbasierte Laserdioden (LD) zeichnen sich durch eine vergleichsweise geringe Leistungsaufnahme und Größe bei hoher Robustheit und Lebensdauer aus - damit besitzen sie deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Festkörperlasersystemen. In der Medizin, Spektroskopie oder Sensorik könnten damit kompaktere und effizientere Systeme realisiert werden. In der Unterhaltungselektronik sind neue Anwendungen, wie zum Beispiel Laserprojektoren mit einer natürlichen Farbwiedergabe bei großer Displaydiagonale, denkbar.

LDs für diesen Wellenlängenbereich erfordern einen Indiumgehalt (x_{QW}) von bis zu 20% in den Indiumgalliumnitrid-Quantenfilmen (InGaN-QW) der aktiven Zone (AR). Die größere Bindungslänge des InN gegenüber GaN erschwert das Wachstum von InGaN und bestimmt maßgeblich die optischen Eigenschaften einer InGaN/GaN-Heterostruktur (MQW). Zum einen akkumuliert das Indium an der Wachstumsoberfläche, wo es desorbiert oder sich in die anschließend abgeschiedene GaN-QW-Barriere einbaut. Zum anderen werden starke piezoelektrische Felder im QW induziert, was beim Wachstum in (0001)-Richtung zu einer räumlichen Trennung der Ladungsträger im Valenz- und Leitungsband und damit einem reduzierten Dipolmoment führt. Letzteres kann über eine Reduzierung der QW-Dicke (d_{QW}) begrenzt werden.

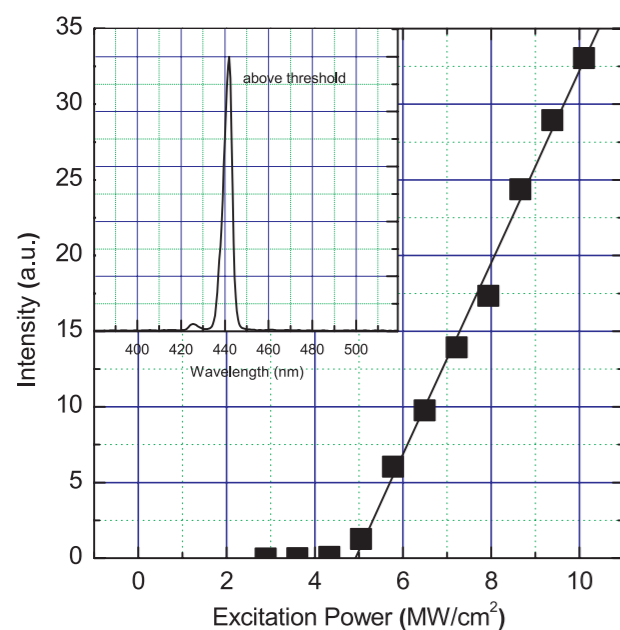


Abb. 1: Emissionsleistung einer optisch gepumpten LD-Struktur (Resonatorlänge 1 mm) in Abhängigkeit von der Anregungsleistung. Kl. Bild: Emissionsspektrum oberhalb der Laserschwelle.
Fig. 1: Emission power of an optically pumped LD structure (cavity length: 1 mm) versus excitation power. Inset: Emission spectra above lasing threshold.

Perfect Layers for Blue Laser Diodes: Epitaxy of InGaN Quantum Wells

Blue-emitting semiconductor laser diodes (LDs) outperform conventional solid-state laser systems in terms of lifetime, robustness, size and power consumption. Due to these advantages, more compact and more efficient systems can be realized in medical technology, sensor technology and spectroscopy. Moreover, new applications in consumer electronics like laser projectors with a natural color rendering over large display areas are possible.

LDs for the blue wavelength region require indium mole fractions up to 20% in the indium gallium nitride (InGaN) quantum wells (QW) of the active region (AR). The longer atomic bond of InN compared to GaN impedes the growth of InGaN and significantly governs the optical properties of the InGaN/GaN heterostructure. On the one hand, indium accumulates at the growth surface where it desorbs or is incorporated in the subsequently grown GaN barrier. On the other hand, strong piezoelectric fields are induced in the QW when growing on the (0001) surface which spatially separates the carriers in the valence and conduction band and reduces the dipole momentum. The latter can be minimized by reducing the QW thickness. Therefore, material technology faces the challenge to fabricate thin QWs with a high indium mole fraction, a high perfection of the crystal and the interfaces, and a steep indium concentration profile all at the same time.

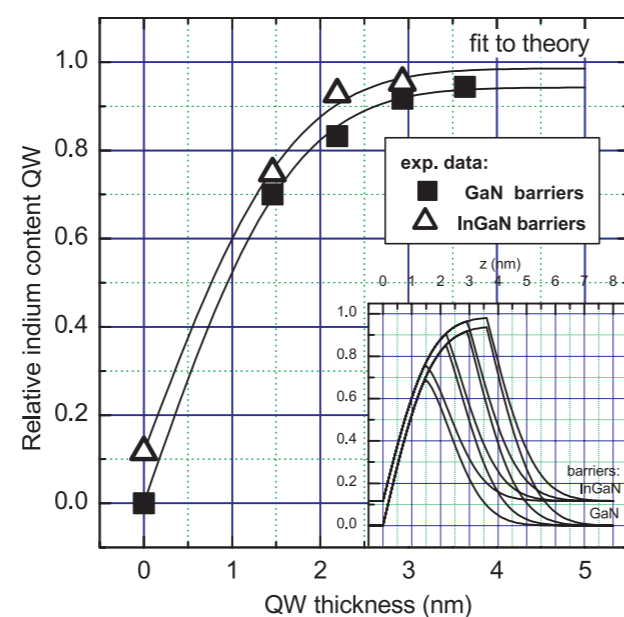
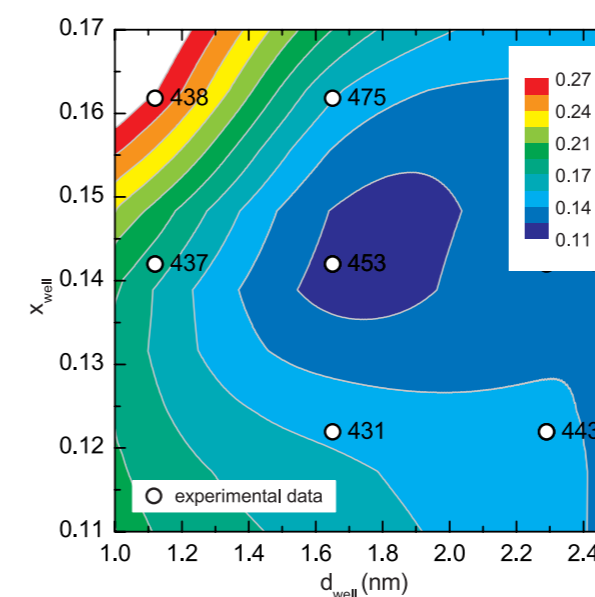


Abb. 2: Datenpunkte zeigen die Änderung von x_{QW} in Abhängigkeit von d_{QW} . Kl. Bild: Modell räumlicher Verteilung der Indiumkonzentration, für gleiche Segregationslänge an der Grenzfläche Barriere/QW und QW/Barriere.
Fig. 2: Average mole fraction of the QW versus QW thickness. Inset: Simulated spatial distribution of the indium mole fraction assuming the same indium segregation length at barrier/QW and QW/barrier interface.

Um LDs zu realisieren, die bei ca. 450 nm emittieren, wurde am FBH zunächst die Auswirkung von d_{QW} und x_{QW} auf die Lichtemission bei niedriger und hoher Anregung untersucht. Die Schichtstruktur besteht aus einer ca. 3 μm dicken n-dotierten GaN:Si-Basissschicht auf (0001)-orientiertem Saphirsubstrat. Darauf wurde eine 1 μm dicke siliziumdotierte Aluminiumgalliumnitrid ($\text{Al}_{0,06}\text{GaN:Si}$)-Mantelschicht und die AR, bestehend aus 1,5 bis 2,5 nm dicken QWs und eingebettet in 7,5 nm dicke GaN-Barrieren, abgeschieden. Zur Führung der optischen Welle ist die AR von 100 nm dicken Wellenleitern umgeben und die Oberfläche durch eine 20 nm dicke $\text{Al}_{0,20}\text{GaN}$ -Schicht abgedeckt. Regt man die Probenstruktur von der Oberfläche her optisch an, kann man in der Niedriganregung die Photolumineszenz (PL) durch die Oberfläche und in der Hochanregung eine verstärkte spontane Emission bis hin zum Lasing durch die Spaltfacetten charakterisieren (siehe Abb. 1).



Targeting on LDs emitting at 450 nm, the influence of the thickness and the indium mole fraction of the QW on its luminescence properties was investigated both under low and high excitation conditions. The hetero-structure on the (0001) sapphire substrate consisted of a 3 μm thick GaN:Si buffer layer, a 1 μm thick $\text{Al}_{0,06}\text{GaN:Si}$ cladding layer, and an AR with 1.5 to 2.5 nm thick QWs separated by 7.5 nm thick GaN barriers. To guide the optical wave, the AR was embedded into 100 nm thick GaN waveguiding layers, and the surface was capped with a 20 nm thick $\text{Al}_{0,20}\text{GaN}$ layer. If this structure is excited from the top, the photoluminescence (PL) emission can be investigated through the top surface at low excitation, whereas the amplified spontaneous emission up to lasing can be characterized through the cleaved facets at high excitation. Fig. 1 shows the corresponding emission spectra peaking in the blue spectral range.

Abb. 3: Verhältnis der PL-Intensität bei 10 K und Raumtemperatur in Abhängigkeit von d_{QW} und x_{QW} . Die RT-PL-Emissionswellenlänge ist neben den Datenpunkten notiert.
Fig. 3: Ratio of PL intensity at room temperature and 10 K versus d_{QW} and x_{QW} . The positions of the experimental data are marked by open circles and accompanied by the RT-PL wavelengths.

Abb. 2 zeigt, dass der mittels Röntgenbeugung bestimmte durchschnittliche Indiumgehalt des QWs mit d_{QW} zunimmt. Basierend auf einem Segregationsmodell kann daraus die Segregationslänge des Indiums (L_{in}) auf 2 nm und das Indiumkonzentrationsprofil des QWs bestimmt werden. Wie sich d_{QW} in der Größenordnung der L_{in} auf die optischen Eigenschaften auswirkt, wurde durch PL-Messungen untersucht (Abb. 3). Die Proben mit kleinstem d_{QW} zeigen die höchste interne Quanteneffizienz. Durch weiterführende Untersuchungen bei hoher Anregungsleistungsdichte soll nun ermittelt werden, ob mit dünnen QWs effiziente Laser mit niedriger Schwellenleistungsdichte realisiert werden können.

The average indium mole fraction of the QWs was determined by X-ray diffractometry. Fig. 2 illustrates that the indium content increases with the thickness of the QW. Fitting experimental data with a segregation model, the profile of the indium mole fraction along the growth direction can be derived. The data suggests an indium segregation length of about 2 nm which is in the order of the QW thickness. How this influences the optical properties of the QW was studied by PL spectroscopy. The thinnest QWs show the highest internal efficiency, as presented in fig. 3. Further high-excitation experiments have to prove that thin QWs are suitable for efficient laser diodes with a low threshold.

Veröffentlichungen // Publications

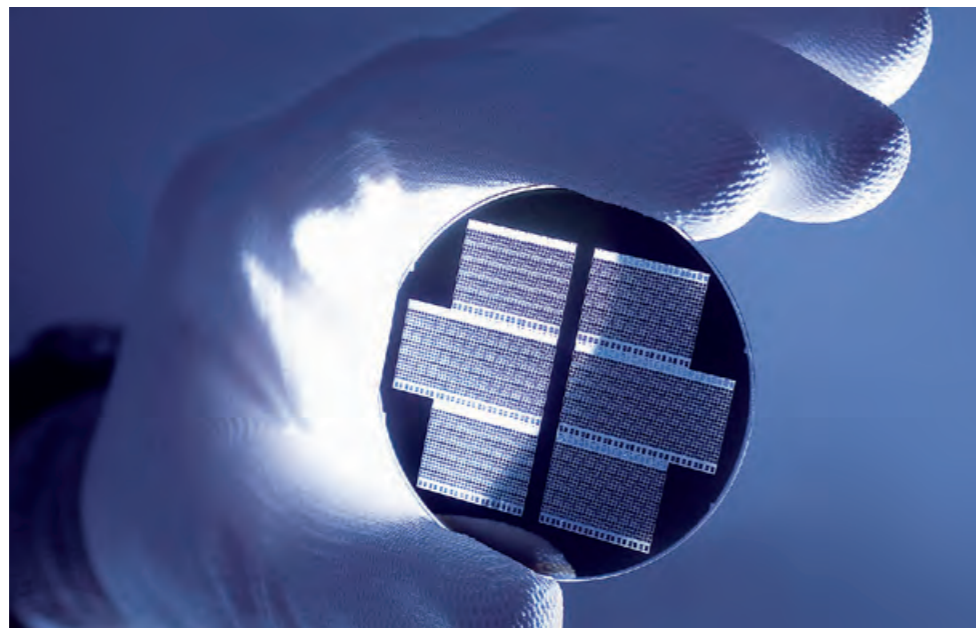
V. Hoffmann, A. Knauer, F. Brunner, C. Netzel, U. Zeimer, S. Einfeldt, M. Weyers, G. Tränkle, J.M. Karaliunas, K. Kazlauskas, S. Jursenas, U. Jahn, J.R. van Look and M. Kneissl, „Influence of MOVPE growth temperature on the structural and optical properties of InGaN MQW laser diodes“, Journal of Crystal Growth 310 21 (2008) 4525-4530.

Leuchtdioden für den UV-A- und UV-B-Spektralbereich

Ultraviolette (UV) Leuchtdioden (LEDs) für das nahe UV (~ 375) nm können als Lichtquelle beispielsweise zum Erkennen gefälschter Banknoten oder zur Detektion von Weißmachern eingesetzt werden. Der Spektralbereich von 320 - 280 nm (UV-B) ist für zahlreiche medizinische Anwendungen wie die Behandlung von Hautkrankheiten, etwa der Schuppenflechte, interessant. Licht im tiefen UV von 200 - 280 nm kann z. B. zur Wasserdesinfektion und Trinkwasseraufbereitung genutzt werden.

Das FBH hat bereits erfolgreich LED-Heterostrukturen für das nahe UV mit InGaN/InAlGaN-MQWs entwickelt. Durch den Übergang zu Multifingerkontakten konnte die Lichtleistung bei gleicher lichtemittierender Fläche auf ca. 6 mW nahezu verdoppelt werden (Abb. 1). Seit Juli 2008 läuft ein BMBF-Projekt zur Entwicklung von LEDs im tiefen UV mit den Verbundpartnern Fraunhofer IAF, der Universität Ulm und der TU Berlin, das auf der Basis dieser Vorarbeiten eingeworben wurde.

UV-LEDs erfordern eine für UV-Licht transparente Al(Ga)N-Basisschicht mit gleichzeitig geringen Defektdichten. Die große Gitterfehlpassung zwischen Al(Ga)N-Schichten und dem Saphirsubstrat und die geringe Beweglichkeit der Aluminiumatome auf der Wachstumsoberfläche führen allerdings zu hohen Versetzungsdichten, Rissen und Aufrauungen. Durch das Wachstum bei hohen Temperaturen mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie und durch die Optimierung der Nukleationsphase bei der AlN-Abscheidung auf Saphir konnten erstmals glatte AlN-Basisschichten mit Oberflächenrauigkeiten von unter 0,5 nm (rms) und Schraubenversetzungsdichten von wenigen 10^8 cm^{-2} hergestellt werden.



Prozessierter 2-Zoll-Wafer mit UV-LEDs.
Processed 2" wafer with UV LEDs.

Light Emitting Diodes for the UV-A and UV-B Spectral Range

Ultraviolet (UV) light emitting diodes (LEDs) are of interest for a great number of applications. Near UV LEDs emitting at 375 nm can be employed as excitation sources to identify counterfeit banknotes and for the measurement of blankophores. LEDs in the UV-B wavelength range (320 - 280 nm) are attractive for medical applications such as treatment of skin diseases like e.g. psoriasis, and LEDs emitting in the UV-C wavelength range (200 - 280 nm) can be used for drinking water purification.

In the past, progress has been made in the development of LEDs in the UV-A wavelength range. Using InGaN/InAlGaN MQW active regions, the maximum output power of 380 nm LEDs on GaN sapphire was almost doubled to about 6 mW for a multi-finger contact LED within the same emitting area (fig. 1). Based on this progress, in July 2008, a BMBF funded research project was launched to develop LEDs in the UV-B and UV-C spectral range with 320 nm being the intermediate target. The joint research project „Deep UV LEDs“ includes the Fraunhofer IAF, TU Berlin and the University of Ulm as partners.

A major challenge for high efficiency deep UV LEDs is the realization of UV transparent and low defect density Al(Ga)N buffer layers on sapphire. The large lattice mismatch to the sapphire and the low mobility of aluminum species on the growth surface make it difficult to achieve AlN layers with smooth surfaces and low dislocation densities. Using a newly developed high-temperature MOVPE growth process, FBH was able to demonstrate thick AlN layers on sapphire with a rms roughness of 0.4 nm. Depending on the sapphire treatment before the start of layer growth, X-ray diffraction peak widths of < 500 arcsec

Die gute Qualität dieser optimierten Basisschichten ermöglichte auch die Realisierung erster LEDs im UV-B-Bereich. Die Dichte an Stufenversetzungen von einigen 10^{10} cm^{-2} ist für effiziente LEDs allerdings noch zu hoch. Auf diesen Basisschichten wurden LED-Heterostrukturen abgeschieden, bestehend aus einer n-dotierten $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ -Kontaktschicht und verschiedenen aktiven Zonen mit $\text{In}_{0,02}\text{Al}_x\text{Ga}_{0,98-x}\text{N}$ -Quantenfilmstrukturen. Der Aluminiumgehalt x in den Quantenfilmen wurde zwischen 0,06 und 0,2 variiert. Das ermöglichte es, LEDs mit Emissionswellenlängen von 345 und 320 nm zu demonstrieren. Die LED-Heterostruktur wurde mit einem Mg-dotierten $\text{GaN}/\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$ -Übergitter als p-Kontaktschicht abgeschlossen.

Die Elektrolumineszenzspektren einiger dieser Strukturen sind in Abb. 2 gezeigt. Für die weitere Entwicklung von effizienten UV-LEDs mit Emission unterhalb 370 nm sind allerdings weitere substanzielle Fortschritte bei der Versetzungsreduktion und der Leitfähigkeit der Kontaktschichten nötig.

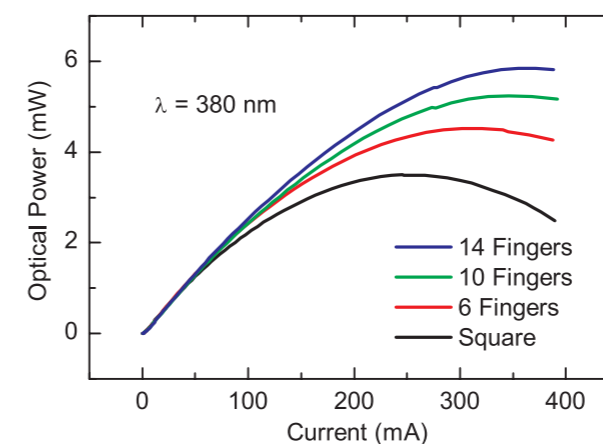


Abb. 1: On-wafer L-I Charakteristik von 380 nm LEDs mit verschiedenen p-Kontaktgeometrien ($A = 0,0225 \text{ mm}^2$).
Fig. 1: On-wafer L-I curves of LEDs at 380 nm with differently shaped p-contact with an area of 0.0225 mm^2 .

in (0002) reflection and < 1000 arcsec in (10 - 12) reflection were obtained. A reduction in screw dislocation density to $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ was achieved. However, the edge dislocation density of 10^{10} cm^{-2} requires further reduction.

LED heterostructures have been grown on the AlN/sapphire templates. They consist of a Si-doped $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ current spreading layer with specific resistivities as low as $0.015 \Omega\text{cm}$. It turned out that increasing the aluminum content in the spreading layer reduces the risk of crack formation but is also correlated with increased resistivity. The active regions were comprised of $\text{In}_{0,02}\text{Al}_x\text{Ga}_{0,98-x}\text{N}$ MQWs with $x = 0.06$ and 0.2 . The heterostructure was completed with a Mg-doped short period $\text{GaN}/\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$ SL. LEDs with λ of 345 and 320 nm were demonstrated. The entire series of LED emission spectra can be seen in fig. 2. While LED operation has been successfully demonstrated further improvements in the defect density, the conductivity of the n- and p-cladding layers will be necessary to obtain high-efficiency UV emitters.

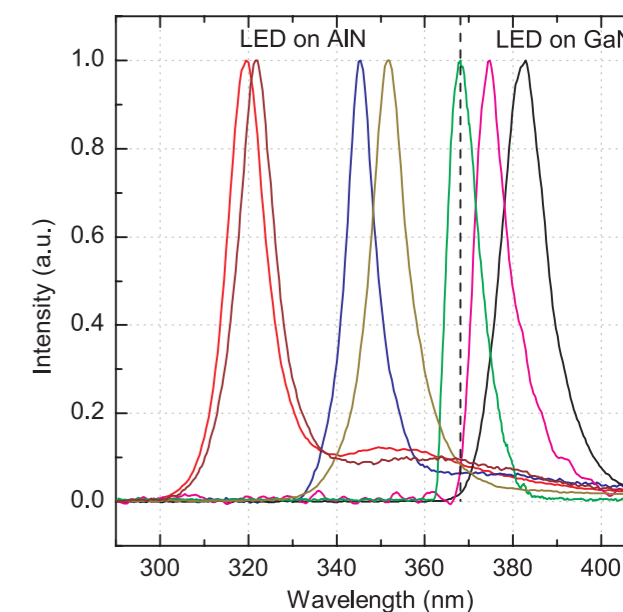


Abb. 2: Elektrolumineszenzspektren von UV LED-Strukturen bei 50 mA.
Fig. 2: Electroluminescence spectra of UV LEDs driven at 50 mA.

Veröffentlichungen // Publications

O. Reentilä, F. Brunner, A. Knauer, et. al., „Effect of the AlN nucleation layer growth on AlN material quality“, J.Crystal Growth 310 4932 (2008).

A. Knauer, H. Wenzel, T. Kolbe, et. al., „Effect of the barrier composition on the polarization fields in near UV InGaN light emitting diodes“, Appl. Phys. Lett. 92, 191912 (2008).

M. Kneissl, „Ultraviolet light-emitting diodes promise new solutions for water purification“, World Water & Environmental Engineering, Vol. 31 (3), 35 (2008).

Lichtemitter auf nichtpolaren Oberflächen: Herausforderungen beim epitaktischen Wachstum

Optoelektronische Bauelemente auf der Basis von Galliumnitrid (GaN) und seinen Legierungen InGaN und AlGaN emittieren Licht vom sichtbaren bis in den ultravioletten Spektralbereich. Bei fast allen GaN-basierten Leuchtdioden (LEDs) und Lasern sind die Kristalle entlang der polaren (0001)-Richtung orientiert, bei der sich eine stabile Wachstumsoberfläche ausbildet. Die resultierenden Polarisations-effekte haben allerdings negative Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften der Lichtemitter. So verursachen sie z. B. eine Wellenlängenverschiebung mit ansteigender Stromdichte und verringern die Effizienz der LEDs. Das Wachstum von Schichten auf nicht- bzw. semipolaren Kristalloberflächen, z. B. den (10 $\bar{1}$ 0) oder (11 $\bar{2}$) Oberflächen, ermöglicht Bauelemente mit verbesserten optischen Eigenschaften. Damit können Leuchtdioden (LEDs) hergestellt werden, die eine starke Polarisation in der Emission aufweisen, was für eine Anwendung in LCD-Displays interessant ist. Da der Einbau von Indium in InGaN-Quantenfilme auf semipolaren Oberflächen effizienter ist als auf der polaren Oberfläche, wäre dies auch ein vielversprechender Ansatz, um erstmals grüne Laserdioden (LDs) zu realisieren. Im Gegensatz zu Bauelementen auf (0001)-Oberflächen existieren bei Quantenfilmen auf nichtpolarem GaN keine Polarisationsfelder. Dies führt bei LEDs zu einer erhöhten Effizienz und ermöglicht eine konstante Emissionswellenlänge unabhängig von der Stromdichte.

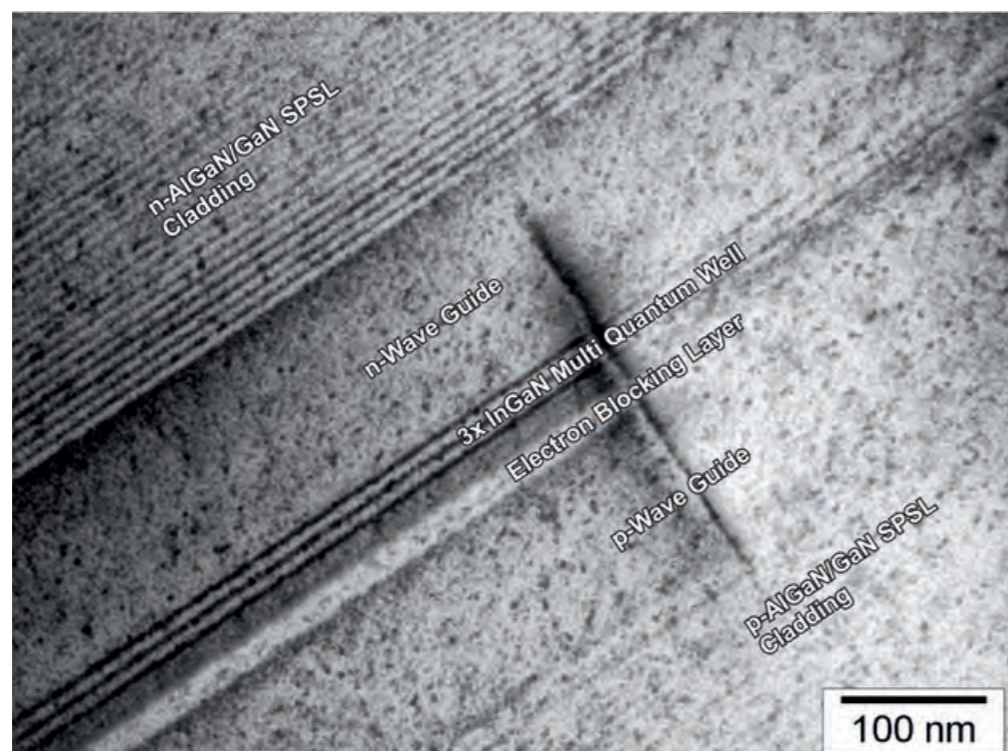


Abb. 1: Querschnitts-TEM-Hellfeldaufnahme der aktiven Zone einer InGaN-Vielfach-Quantentopf-Laserstruktur auf (10 $\bar{1}$ 0) m-plane GaN.
Fig. 1: Cross-sectional TEM bright field image of the separate confinement heterostructure region of an InGaN MQW laser heterostructure grown on (10 $\bar{1}$ 0) m-plane GaN.

Nonpolar Light Emitters: Challenges in Epitaxial Growth

Optoelectronic devices based on gallium nitride (GaN) and its alloys InGaN and AlGaN are capable of emitting light from the visible to the ultraviolet spectral region. Currently almost all of the light emitting diodes (LEDs) and lasers are grown on GaN crystals that are oriented in the polar (0001) c-plane direction, providing a stable growth surface. The resulting polarization fields also have detrimental effects on the optical properties of nitride light emitters, e.g. causing significant wavelength shifts and reduced efficiencies in InGaN LEDs. Growth on crystal surfaces with non- and semipolar orientations, e.g. (10 $\bar{1}$ 0) m-plane or (11 $\bar{2}$), could enable devices with new and improved optical properties. For example, for nonpolar and semipolar light emitting diodes the degree of polarization of the emitted light can be tailored. Furthermore it might be possible to realize green laser diodes for the first time, since the indium incorporation is enhanced for semipolar orientations. In contrast to c-plane GaN there is no polarization field across quantum wells on nonpolar GaN. By reducing the polarization fields an increase in the radiative recombination rate and reduced wavelength shift with increasing drive current can be expected.

One of the biggest challenges for the growth of light emitters on non- and semipolar GaN is the choice of a suitable substrate: Heteroepitaxial growth on sapphire or

Eine besondere Herausforderung beim Wachstum von nicht- und semipolarem GaN ist die Wahl des geeigneten Substrates: Fremdsubstrate wie Saphir oder LiAlO₂ erlauben zwar eine Abscheidung auf 2-Zoll-Wafern, haben jedoch im Vergleich zu c-plane GaN auf Saphir eine sehr hohe Defektdichte - typische Halbwertsbreiten von Röntgenbeugungs-Rocking-Kurven liegen bei > 900". Im Gegensatz dazu zeigen homoepitaktische Schichten auf GaN-Substraten eine exzellente Kristallqualität mit Halbwertsbreiten von Rocking-Kurven < 150"; sie sind aber nur in sehr geringen Größen von maximal 5 x 20 mm² verfügbar. Wegen der hohen Defektdichte eignen sich nicht- und semipolare GaN-Schichten auf Fremdsubstraten nicht für die Herstellung von Laserdioden. Qualitativ hochwertige Schichten lassen sich auf bulk GaN-Substraten abscheiden, wie die Transmissionselektronenmikroskop-Aufnahme in Abb. 1 zeigt.

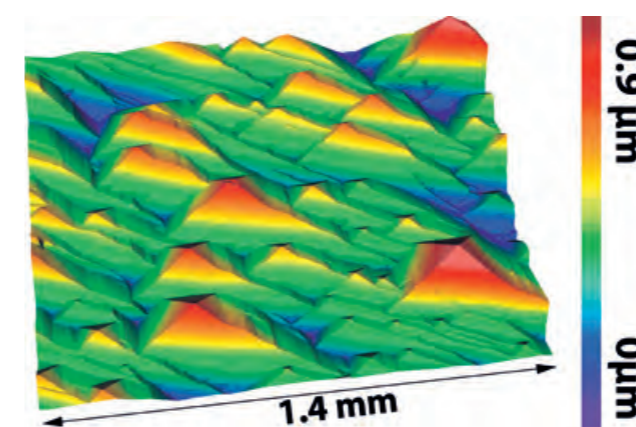


Abb. 2: Scanning-Weißlicht-Interferometer-Aufnahme, die die Topologie einer GaN-Schicht auf m-plane Substrat zeigt. Die bis zu 1 μ m hohen Pyramiden haben Seitenwinkel von 0,2 - 0,5".
Fig. 2: Scanning white light interferometry micrograph showing the topology of a GaN layer on m-plane bulk substrate. The pyramidal structures are up to 1 μ m high and have slope angles of 0.2 - 0.5°.

Allerdings ist auch das Wachstum auf m-plane GaN-Substraten nicht problemlos: Die Schichten zeigen eine deutliche Morphologie (siehe Abb. 2), die zu einer Verschlechterung der optischen und elektrischen Eigenschaften führt. Die Prozessierung von Bauelementen ist im Vergleich zu 2-Zoll-Substraten deutlich komplizierter: In Zusammenarbeit mit den Abteilungen Material- und Prozesstechnologie und dem Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik wurden Fabrikationsprozesse entwickelt, die es ermöglichten, erste nichtpolare LEDs und Breitstreifen-Laserdioden herzustellen. Eine LED mit einer Ausgangsleistung von 2,5 mW bei 416 nm (siehe Abb. 3) wurde bereits realisiert sowie eine optisch gepumpte Laserstruktur, an der eine verstärkte stimulierte Emission beobachtet wurde.

LiAlO₂ allows the deposition of GaN on 2" diameter wafers and larger. However, these layers show a very high defect density in comparison to c-plane GaN on sapphire with FWHM larger than 900 arcsec as determined by X-Ray diffraction rocking curves. On the other hand, homoepitaxial layers on bulk GaN substrates exhibit an excellent crystal quality (FWHM < 150 arcsec in XRD rocking curves) but are currently only available in very small sizes up to 5 x 20 mm². Due to their high defect density, in particular a large concentration of basal plane stacking faults and threading dislocations, non- and semipolar GaN layers on foreign substrates so far turned out not to be suitable for creating high-efficiency LEDs and laser diodes. High-quality laser heterostructures with very low defect densities can be grown on bulk m-plane GaN substrates as shown in the transmission electron microscopy micrograph (TEM) of fig. 1.

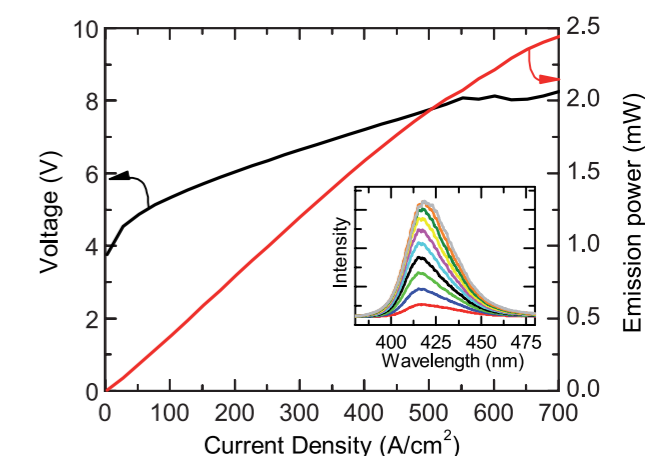


Abb. 3: L-I und V-I Kennlinien einer LED-Struktur auf m-plane GaN. Eingelegt sind die Spektren bei 125 - 1250 A/cm² in 125 A/cm² Schritten.
Fig. 3: L-I and V-I curves of a LED on m-plane GaN. The inset shows the spectra recorded from 125 - 1250 A/cm² in steps of 125 A/cm².

However, the growth of layers on m-plane GaN has its own challenges. The layers exhibit a distinct surface morphology (see fig. 2) resulting in a distortion of the optical and electronic properties of the emitter heterostructure. Furthermore, due to their small size, the fabrication process for LEDs and lasers is much more complex than for full 2" wafers. In cooperation with the Materials Technology and Process Technology Department as well as the GaN Optoelectronics Business Area, epitaxial growth and device fabrication processes were developed to realize first LED test structures and broad area laser devices on nonpolar surfaces. Current-injection InGaN MQW LEDs near 410 nm with a maximum output power of 2.5 mW were realized on m-plane GaN substrates (see fig. 3) and amplified stimulated emission was observed in optically pumped violet laser heterostructures.

Veröffentlichungen // Publications

- C. Netzel, T. Wernicke, F. Brunner, U. Zeimer, M. Weyers, M. Kneissl, „Near band edge and defect emissions from ELOG a-plane GaN with different stripe orientations“, *Journal of Crystal Growth*, 310, 8 (2008).
- B. Bastek, F. Bertram, J. Christen, T. Wernicke, M. Weyers, M. Kneissl, „A-plane GaN ELO structures: growth domains, morphological defects, and impurity incorporation directly imaged by cathodoluminescence microscopy“, *Applied Physics Letters*, 92, 212111 (2008).
- G. Irmer, T. Brumme, M. Herms, T. Wernicke, M. Weyers, „Anisotropic strain on phones in a-plane GaN layers studied by Raman scattering“, *J. of Mat. Science: Materials in Electronics*, 19, S. 51 (2008).
- T. Wernicke, C. Netzel, M. Weyers, M. Kneissl, „Semipolar GaN grown on m-plane sapphire using MOVPE“, *Physica Status Solidi c*, 5, 1815-1817 (2008).
- T. Wernicke, U. Zeimer, M. Herms, M. Weyers, M. Kneissl, G. Irmer, „Micro structure of a-plane $(2\bar{1}\bar{1}0)$ GaN ELOG stripe patterns with different in plane orientation“, *J. of Mat. Science: Materials in Electronics*, 19, S. 46 (2008).
- Z. H. Wu, A. M. Fischer, F. A. Ponce, B. Bastek, J. Christen, T. Wernicke, M. Weyers, M. Kneissl, „Structural and optical properties of non-polar GaN thin films“, *Applied Physics Letters*, 92, 171904 (2008).
- W. Neumann, A. Mogilatenko, T. Wernicke, E. Richter, M. Weyers, M. Kneissl, „Structure investigations of nonpolar GaN layers“ *Journal of Microscopy*, in press.
- T. Wernicke, U. Zeimer, C. Netzel, F. Brunner, A. Knauer, M. Weyers, M. Kneissl, „Epitaxial Lateral Overgrowth on $(2\bar{1}\bar{1}0)$ a-Plane GaN with $[0\bar{1}11]$ Oriented Stripes“, *Journal of Crystal Growth*, in press.

MATERIALIEN UND PROZESSE
MATERIALS AND PROCESSES

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

Materialien und Prozesse

Das FBH hat den Schwerpunkt seiner technologischen Arbeiten in den vergangenen Jahren vom etablierten, gut beherrschten Galliumarsenid (GaAs) zunehmend hin zu den Gruppe-III-Nitriden verlagert. An der Erhöhung der Effizienz oder der Verbesserung der spektralen Eigenschaften von GaAs-Laserdioden wird jedoch weiter intensiv gearbeitet. Bei den Galliumnitrid (GaN)-Bauelementen konzentrieren sich die Aktivitäten auf Leistungsbaulemente für Mikrowellen- und Leistungs-Schaltanwendungen, UV-LEDs und Laserdioden.

Gruppe-III-Nitride besitzen spezifische Eigenschaften, deren effiziente Umsetzung in elektronische und optoelektronische Bauelementkonzepte erhebliche Arbeiten erfordert. Die Bereiche Materialtechnologie, Prozesstechnologie und Grundlagen für neue Bauelementkonzepte nehmen hierbei eine Schlüsselposition ein. Diese Aktivitäten liefern die technologischen Voraussetzungen für gezielte Entwicklungen von Bauelementen, die später in den jeweiligen Geschäftsbereichen durchgeführt werden.

Beispiele dafür sind die 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 Grundlage für ultraviolette Leuchtdioden geforscht. Von zentraler Bedeutung, insbesondere für GaN-basierte Laserdioden, sind GaN-Substrate mit geringer Defektdichte. Das FBH arbeitet an deren Herstellung mittels Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE).

Im Bereich der Bauelementprozessierung konzentrierten sich die Arbeiten auf die Entwicklung von Trockenätzverfahren für GaN-basierte LEDs und Laser sowie für Hochleistungstransistoren mit „Embedded oder Recessed Gates“. Im Bereich der GaN-Optoelektronik für UV-LEDs und Laser steht die Entwicklung von geeigneten Ohm'schen Kontakten zu p-GaN und n-AlGaIn im Vordergrund. Außerdem wurden Verfahren zur Herstellung strukturierter Submounts für Diodenlaser und zur „Under Bump“ Metallisierung für GaN-Transistoren entwickelt. Ein kombiniertes Verfahren aus Laserbohren und Plasmaätzen ermöglicht die Realisierung von vertikalen elektrischen Verbindungen (Vias) zum Source-Kontakt von GaN-basierten Leistungstransistoren auf Siliziumcarbid-Substraten.

Neben den Basisentwicklungen in der Epitaxie und Prozesstechnologie, laufen im Bereich Materialien und Prozesse auch die externen Dienstleistungen wie Lieferung von Epitaxiewafern, Analytik von Schicht- und Bauelementstrukturen sowie Waferprozesse für Kunden aus Forschung und Industrie.

Materials and Processes

During the recent years, FBH gradually changed its focus from well-established GaAs technology to group-III nitrides for both, electronic and optoelectronic applications. However, research on GaAs-based laser diodes to increase efficiency and to improve spectral properties is still intensively pursued. Regarding group-III nitrides, the work focuses on power devices for microwave and power switching applications as well as on UV LEDs and laser diodes.

In order to successfully transfer the specific properties of group-III nitrides into devices, enormous basic research is necessary regarding material improvement, process development and stabilization as well as verifying and testing of new device concepts. Still, many material-related issues have to be clarified, as these investigations have an enabling character and thus play a key role in the development of such devices. They are the precondition for targeted development of devices in the respective business area.

Examples for such basic investigations are e.g. epi-layer developments for high-voltage high-power switching transistors and developments towards non-polar Ga(In)N layer structures for highly efficient blue and green laser diodes. Furthermore, research on AlN layers with low defect density proceeds, paving the way for efficient ultraviolet LEDs. GaN substrates are of central importance for GaN-based laser diodes because of their low defect density. FBH is intensively pursuing this concept by using Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE).

In processing, considerable activities have been executed in order to establish dry etching techniques for GaN-based LEDs and lasers as well as for high-power transistors with embedded or recessed gates. For GaN LEDs and lasers, the development of Ohmic contacts to p-GaN and n-AlGaIn is of the utmost significance. Furthermore, techniques have been developed for manufacturing patterned submounts for diode lasers and under bump metalization for GaN-based transistors. A novel combination of laser drilling and plasma etching allows the fabrication of vertical interconnect accesses (vias) to source contacts of GaN-based high-power transistors on silicon carbide substrates.

In addition to the basic developments in epitaxy and processing, external services such as delivery of epitaxial wafers, analyses of device structures as well as customer-related wafer processes are part of the materials and processes activities.

Entwicklung defektarmer Substrate mithilfe der GaN-HVPE

Die Hydridgasphasenepitaxie von GaN (GaN-HVPE) soll die Gewinnung hochwertiger GaN-Substrate für das homoepitaktische Wachstum von Strukturen für UV-LEDs und für blaue Laserdioden mit hoher Leistung und Lebensdauer ermöglichen. Blaue Laserdioden erlauben die hohe Speicherdichte der Blu-ray Disc und GaN-LEDs spielen eine wichtige Rolle in der Beleuchtungs-, Display- und Projektionstechnik.

Durch etablierte Verfahren der Volumenkristallzucht können geeignete GaN-Substrate für solche Bauelemente allerdings bisher nicht hergestellt werden. Die meisten Schichtstrukturen werden deshalb auf einem Fremdsubstrat wie Saphir hergestellt. Die damit verbundenen hohen Versetzungsdichten von bis zu 10^{10} cm^{-2} begrenzen die Effizienz und Lebensdauer der Bauelemente. Durch geeignete Technologien kann die Versetzungsdichte zwar abgesenkt werden, doch sie ist mit mehr als 10^6 cm^{-2} für viele Anwendungen noch zu hoch. Hinzu kommen Probleme wie ungenügende Wärmeleitfähigkeit des Substrats oder starke Durchbiegungen durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten. Weltweit wird daher an Möglichkeiten zur Herstellung defektarmer GaN-Substrate geforscht.

Die für die HVPE typischen hohen Wachstumsraten von bis zu $500 \mu\text{m/h}$ versprechen neben der Herstellung einzelner GaN-Substrate durch Ablösung von einem Fremdsubstrat auch die Züchtung von GaN-Massivkristallen. Bei der GaN-HVPE wird Ga mittels HCl zu GaCl umgesetzt, welches dann zusammen mit NH_3 bei 980°C bis 1070°C GaN bildet. In enger Kooperation mit den Anlagen- und Substratherstellern Aixtron und FCM wird im Rahmen eines durch das BMBF geförderten Vorhabens am FBH die Herstellung von sehr dicken GaN-Schichten bis hin zu Massivkristallen entwickelt. Die Arbeiten am FBH konzentrierten sich 2008

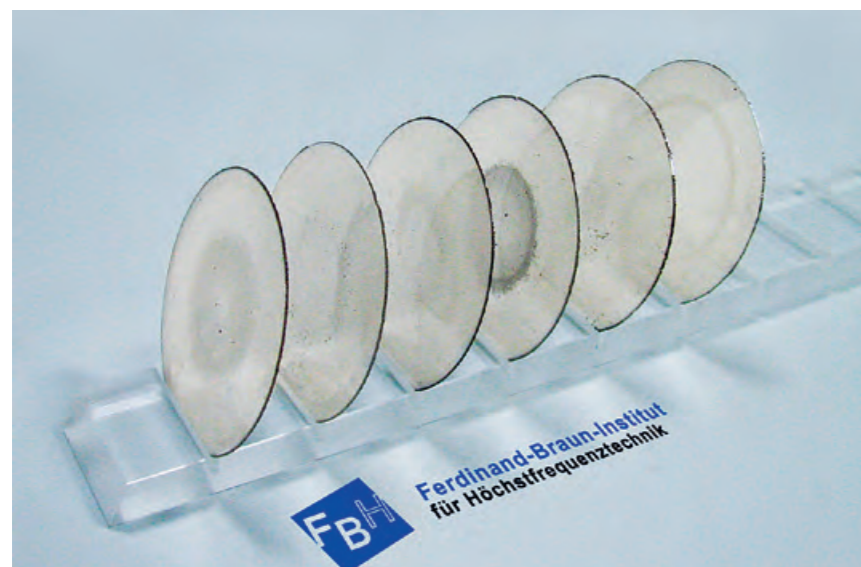


Abb. 1: 2-Zoll-GaN-Substrate.
Fig. 1: Freestanding 2 inch GaN substrates.

Development of Low Defect Density Substrates by GaN HVPE

Hydride vapor phase epitaxy of GaN (GaN HVPE) is the process of choice towards high-quality GaN substrates for homoepitaxial growth of heterostructures for UV LEDs and blue laser diodes with high output power and high reliability. Blue laser diodes enable the high storage capacity of Blu-ray Discs and GaN LEDs play a pivotal role in solid-state lighting, display and projection technology.

However, the standard methods for bulk crystal growth are not suited to produce GaN substrates required for such devices. Most layer structures are thus grown on foreign substrates like sapphire. The resulting dislocation densities of up to 10^{10} cm^{-2} limit both, the efficiency and the reliability of the devices. While elaborated epitaxial growth technologies help to reduce the defect density, the obtained level of 10^6 cm^{-2} still is too high for many applications. Heteroepitaxy also brings along problems like insufficient thermal conductivity of sapphire substrates and substantial bowing caused by differences in thermal expansion. Thus, possibilities for cost-efficient manufacture of GaN substrates with low defect density are being explored worldwide.

High growth rates of up to $500 \mu\text{m/h}$ enabled by HVPE not only allow for growth of single substrates by separation from the foreign starting substrate but also for growth of bulk crystals. In GaN HVPE Ga is reacted with HCl to GaCl, which, together with NH_3 , then forms GaN at temperatures of 980°C to 1070°C . In close cooperation with the equipment and substrate manufacturers Aixtron and FCM, FBH is working on the growth of very thick GaN layers up to bulk crystals within a BMBF-funded project. In 2008, work at FBH was focussed on optimizing freestanding GaN substrates. Fig. 1 shows 2 inch GaN substrates with defect densities of around 10^7 cm^{-2} . An improved mask geometry for the self-separation layer resulted in a reduction of wafer bow from $450 \mu\text{m}$ to $300 \mu\text{m}$.

insbesondere auf die Verbesserung freistehender GaN-Substrate. Abb. 1 zeigt 2-Zoll-GaN-Substrate, deren Versetzungsdichte ca. 10^7 cm^{-2} beträgt. Die Einführung einer neuen Maskengeometrie führte zu einer Verringerung der Waferdurchbiegung von $450 \mu\text{m}$ auf $300 \mu\text{m}$.

Weiterhin wurde, basierend auf den Erfahrungen am FBH, eine verbesserte vertikale HVPE-Anlage (Abb. 2) konstruiert, gebaut und am Institut in Betrieb genommen. Eine hohe Materialqualität mit nur geringer Verunreinigung durch Sauerstoff von 10^{16} cm^{-3} und eine Schichtdickenhomogenität von 3% wurde bei einer Wachstumsrate von $150 \mu\text{m/h}$ erreicht. Wachstumsuntersuchungen zeigten, dass die Entstehung pitartiger Morphologiestörungen bei verschiedenen Reaktordrücken durch ein jeweils geeignetes V/III-Verhältnis minimiert werden kann. Die Bildung von Rissen hängt dagegen stark von der Wachstumstemperatur ab. Beispielhaft für geeignete Bedingungen ist die $90 \mu\text{m}$ dicke und rissfreie, auf Saphir haftende GaN-Schicht in Abb. 3. Kathodolumineszenz-Untersuchungen an $1,5 \text{ mm}$ dicken Schichten zeigten, dass sich die Materialqualität bei zunehmender Schichtdicke noch verbessert. Damit wurden Grundlagen für das Wachstum längerer GaN-Boules am FBH geschaffen.

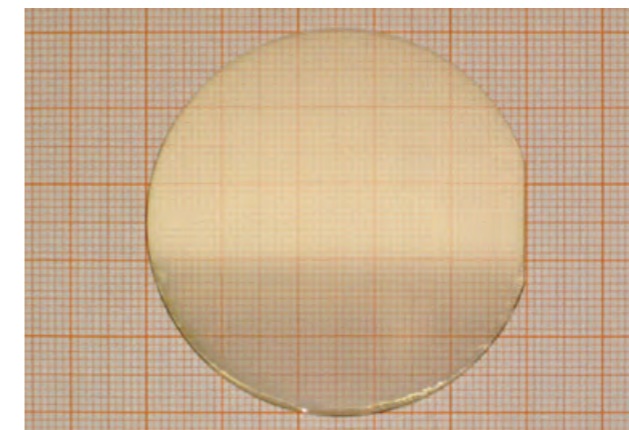


Abb. 3: $90 \mu\text{m}$ dicke, rissfreie GaN-Schicht auf Saphir.
Fig. 3: $90 \mu\text{m}$ thick crack-free GaN layer on sapphire.

In addition, a new vertical HVPE system (fig. 2) featuring improvements based on FBH's experience was constructed, installed and put into operation. High purity with low oxygen around 10^{16} cm^{-3} and a thickness homogeneity of 3% over 2 inch were achieved at a growth rate of $150 \mu\text{m/h}$. Further growth investigations showed, that the density of pit-like defects can be minimized by properly combining reactor pressure and V-III ratio. However, crack formation is strongly dependent on growth temperature. As an example for the results obtained under optimized conditions, fig. 3 shows a $90 \mu\text{m}$ thick crack-free GaN layer on sapphire. Cathodoluminescence images on 1.5 mm thick layers reveal a further improvement of material quality with increasing layer thickness. Thus, at FBH growth of GaN boules of several mm length can now be aimed for.



Abb. 2: Neue vertikale HVPE-Anlage.
Fig. 2: New vertical HVPE system.

Veröffentlichungen // Publications

Ch. Hennig, E. Richter, M. Weyers, G. Tränkle, „Freestanding 2-inch GaN layers using lateral overgrowth with HVPE“, Journal of Crystal Growth 310 (2008) 911-915.

Herstellung von AlGaN-Substraten mittels HVPE

Aluminiumgalliumnitrid ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) ist die Basis für Leuchtdioden im ultravioletten Spektralbereich von 210 bis 370 nm. Durch die Variation des AlN-Anteils x im $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ können die optischen Eigenschaften des Materials eingestellt werden. Die Transparenz für die emittierte Strahlung und die Materialqualität sind wichtige Parameter für Substrat und Pufferschichten. Für die Herstellung von Bauelementstrukturen stehen keine $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Substrate aus herkömmlichen Volumenwachstumsverfahren zur Verfügung, deshalb werden Fremdsubstrate - für LEDs in der Regel Saphir - eingesetzt. Dies führt jedoch zu hohen Defektdichten, z. B. durch Versetzungen in den AlGaN-Schichten der Bauelemente. Hierbei gilt, mit zunehmender Schichtdicke nimmt die Versetzungsdichte ab. Dicke AlGaN-Schichten als Unterlage für gitterangepasste Bauelementstrukturen eröffnen daher die Möglichkeit, durch minimierte Verspannungen und reduzierte Defektdichten qualitativ hochwertigere Halbleiterbauelemente zu realisieren. Die für dicke Pufferschichten nötigen Wachstumsraten können mit der Hydrid-Gasphasen-Epitaxie (HVPE) erzielt werden. Allerdings wird das HVPE-Wachstum von $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bisher nur von wenigen Gruppen weltweit untersucht.

Ein konventioneller horizontaler HVPE-Reaktor (Abb. 1) der Firma AIXTRON, der bereits erfolgreich für das Wachstum dicker GaN-Schichten verwendet wird, wurde für das Wachstum von AlGaN modifiziert. Neben dem Einbau einer Aluminium-Quelle und einer Mischzone für GaCl und AlCl_3 wurde auch der Temperaturverlauf in Strömungsrichtung an die Anforderungen des AlGaN-Wachstums angepasst. Die Ausgangsstoffe AlCl_3 und GaCl, die mit Ammoniak zum gewünschten $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Mischkristall reagieren, werden in Quarzbooten mit hochreinem Al- und Ga-Metall erzeugt, wobei über die getrennt regelbaren Flussmengen des übergeleiteten HCl der Al-Gehalt eingestellt werden kann. Dünne GaN-, AlN- oder AlGaN-Schichten auf Saphir-Substraten aus der MOVPE bilden die Basis für das HVPE-Wachstum von AlGaN.

Development of AlGaN Substrates by HVPE

Aluminum gallium nitride ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) is the basis for light emitting diodes (LEDs) in the UV spectral range from 210 to 370 nm. The optical properties of the material system can be adjusted by the variation of the AlN fraction x in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Transparency for the emitted light and material quality are fundamental parameters for substrate and buffer layers. Until now, for the production of device structures no $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ substrates from conventional bulk growth methods are available. Hence, foreign substrates - commonly sapphire for LEDs - are used. However, this leads to high defect densities, e.g. due to dislocations in the AlGaN layers. Increasing the layer thickness enables lower defect density. Thus, thick AlGaN layers can serve as lattice matched templates with low defect density allowing for semiconductor devices with improved performance. The high growth rates needed for thick buffer layers can be achieved by hydride vapor phase epitaxy (HVPE). However, only a few groups worldwide examine HVPE growth of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ so far.

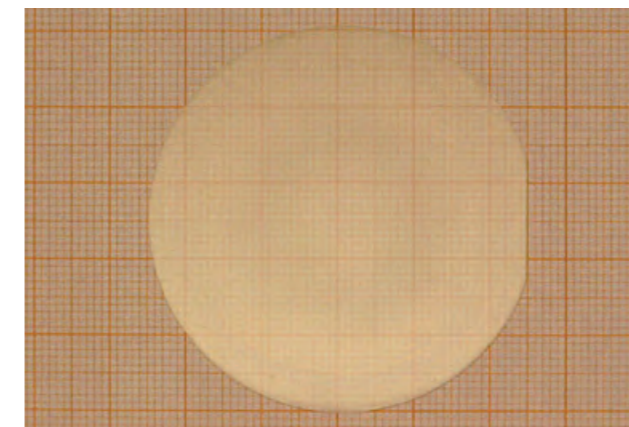
A conventional horizontal AIXTRON HVPE reactor (fig. 1), which is already successfully being used for the growth of thick GaN layers, was modified for AlGaN growth. In addition to integrating an aluminum source and a mixing zone for GaCl and AlCl_3 , the temperature profile in flow direction was adapted to AlGaN growth requirements. The precursors AlCl_3 and GaCl, that react with ammonia to build the desired $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -mixed crystal, are synthesized using HCl in quartz boats containing high-purity Al and



Abb. 1: Horizontale HVPE-Anlage zum Wachstum von Nitriden.
Fig. 1: Horizontal HVPE reactor for nitride growth.

Von bekannten Wachstumsparametern für GaN ausgehend, wurden auf GaN/Saphir-Startschichten durch die schrittweise Erhöhung des AlCl_3 -Flusses $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichten im gesamten Kompositionsbereich von $x = 0$ bis 1 abgeschieden. Die Bestimmung des Al-Gehalts der Proben erfordert eine genaue Bestimmung der räumlichen Ausdehnung der $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Volumenzelle, da die Gitterkonstanten sowohl vom Al-Gehalt als auch vom Grad der Relaxation auf dem Fremdsubstrat abhängen. Hierzu erfolgt die Messung von reziproken Gitterkarten in der Röntgenbeugung zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Gitterkonstanten a und c . Die strukturelle Charakterisierung der Wachstumsfront durch mikroskopische Aufnahmen zeigt mit zunehmendem Al-Gehalt der Schichten eine Zunahme der Oberflächendefekte in Form von fehlorientierten Kristalliten. Wachstumsexperimente belegen den starken Einfluss parasitärer Vorreaktionen von AlCl_3 mit NH_3 , da sowohl bei einem verminderten Totaldruck als auch bei abgesenktem NH_3 -Fluss der Al-Gehalt der Probe bei ansonsten gleichbleibenden Parametern zunimmt. Durch Anpassen der Wachstumsparameter konnten spiegelnde Schichten mit $0 < x < 0,2$ ohne fehlorientierte Kristallite mit Wachstumsraten bis $50 \mu\text{m}/\text{h}$ gewachsen werden (Abb. 2a). Die Halbwertsbreiten der Rockingkurven, die ein Maß für die Materialqualität sind, liegen im Bereich der Halbwertsbreiten, die für die sehr viel langsamere gewachsenen MOVPE $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Schichten ermittelt wurden. Kathodolumineszenz-Spektren zeigen Emission bei der für die Zusammensetzung x zu erwartenden Wellenlänge, z. B. 330 nm für $x = 0,15$, und eine breite O-gebundene Defektlumineszenz bei längeren Wellenlängen (Abb. 2b).

a)



b)

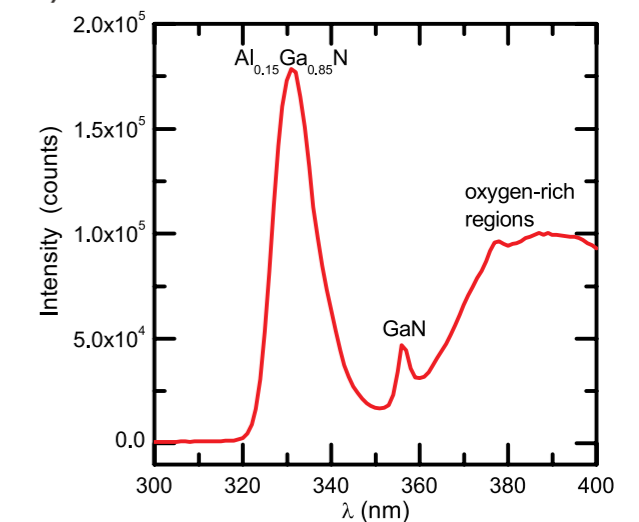


Abb. 2: $0,8 \mu\text{m}$ dicke, mittels HVPE gewachsene $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$ -Schicht auf GaN/Saphir (a) und das zugehörige Kathodolumineszenz-Spektrum der Probe bei 80 K (b).
Fig. 2: $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$ layer of $0.8 \mu\text{m}$ thickness grown by HVPE on GaN/sapphire (a) and the corresponding cathodoluminescence spectrum at 80 K (b).

Um die grundlegenden Zusammenhänge und Vorgänge über den Quellen und im Substratbereich zu beschreiben, wurde ein Modell verwendet, das die chemischen Reaktionen im thermodynamischen Gleichgewicht betrachtet. Für Wachstumsparameter, die näherungsweise diesem stark vereinfachten Gleichgewichts-Fall genügen, z. B. durch Vermeidung von Vorreaktionen des reaktionsfreudigen Aluminiumchlorids in der Gasphase, beschreibt dieses Modell den experimentell beobachteten Zusammenhang von Al-Gehalt der Schicht x und Anteil des AlCl_3 am Gesamt-Chloridfluss $\text{AlCl}_3 + \text{GaCl}$ mit guter Übereinstimmung (Abb. 3).

Die laufenden Arbeiten konzentrieren sich auf die Verbesserung der Oberflächenmorphologie, insbesondere für $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Schichten mit $x > 0,2$, die Unterdrückung von Vorreaktionen und die Reduktion der O-Kontamination mit dem Ziel, dickere und qualitativ verbesserte Schichten als Unterlage für z. B. UV-LEDs zu wachsen.

In order to understand the correlation of processes in the source and substrate zone, a model is used describing the chemical reactions in the thermodynamic equilibrium. For growth parameters, which are satisfying this simplified assumption of equilibrium, e.g. by suppression of pre-reactions of reactive aluminum chloride in the vapor phase, the calculated values (fig. 3) are well corresponding with the experimentally found relation between the fraction of AlCl_3 in the total chloride flow $\text{AlCl}_3 + \text{GaCl}$ and the Al content in the layer.

Current work focuses on obtaining smoother surfaces, especially for $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ layers with $x > 0,2$, suppression of pre-reactions and reduction of O contamination, with the final goal of obtaining thick layers with enhanced quality as pseudo substrate for UV LEDs.

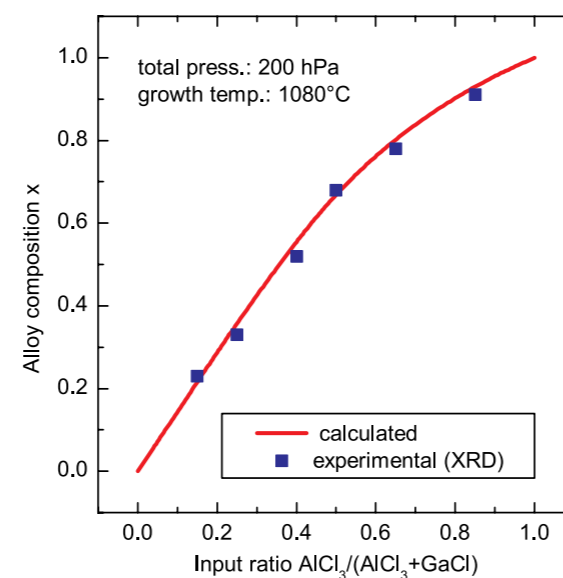


Abb. 3: Vergleich der experimentell (Quadrate) und rechnerisch (Linie) bestimmten Abhängigkeit der AlGaIn-Komposition x vom Eingangsverhältnis der Chloride. Für die Rechnung wurde eine 100%ige Quelleneffizienz angenommen. Fig. 3: Comparison of experimental (squares) and calculated (line) dependence of the AlGaIn composition x on the chloride input ratio. A 100% source efficiency was assumed for calculation.

Veröffentlichungen // Publications

S. Hagedorn, E. Richter, C. Netzel, U. Zeimer, M. Weyers, and G. Tränkle, „HVPE growth of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloy layers“, *phys. stat. sol. (c)*, accepted for publication 2008.

Lasergestützte Erzeugung von Vias durch Siliziumcarbid

Mit vertikalen elektrischen Verbindungen (Vias) lassen sich Hochleistungstransistoren sehr effizient und mit geringer Induktivität kontaktieren. Dank dieser kurzen Verbindungen durch das Substrat können elektronische Bauelemente kompakter in die Peripherie integriert werden, außerdem steigt die maximale pro Chip verfügbare Ausgangsleistung.

GaN-basierte Hochleistungstransistoren werden auf Siliziumcarbid (SiC)-Substraten hergestellt. SiC zeichnet sich durch eine hohe chemische Stabilität und extreme Härte aus. Da selbst modernste, induktiv gekoppelte Plasmaätzverfahren (ICP) nur geringe Ätzraten von $\sim 1 \mu\text{m}/\text{min}$ erreichen und eine widerstandsfähige Maskierung erfordern, sind wirtschaftliche Alternativen für die Herstellung von Mikrolöchern in SiC gefragt, wie beispielsweise die Technik der direkten Strukturierung durch Laserablation.

Dazu wurde am FBH bereits in den Vorjahren eine Technologie entwickelt, bei der mit Nanosekundenpulsen eines frequenzverdreiften Nd:YAG-Festkörperlasers Mikrolöcher vollständig durch das SiC-Substrat gebohrt wurden. Der Laserstrahl mit gaußförmigem Intensitätsprofil wird bewegt, um eine Durchgangsbohrung mit dem gewünschten Durchmesser zu erzeugen. Dadurch erhält das Kontaktpad des Bauelements ein Loch. Soll dies vermieden werden, bietet sich der Einsatz eines Excimerlasers mit homogenisiertem Strahlprofil an.

2008 wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Sackloch-Vias für AlGaIn/GaN-HEMTs (High-Electron Mobility Transistors) auf SiC erzeugt werden. Die Wafer werden auf eine Dicke von $100 \mu\text{m}$ abgedünnt und auf der Rückseite mit einer Schutzschicht aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) beschichtet. Der technologische Ablauf ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Laser-Assisted Processing of Vias through Silicon Carbide

Vertical interconnect accesses (vias) exhibit low inductance and offer an efficient way for electrically contacting high-power transistor devices. The short connection through the substrate allows for more compact integration into the periphery and higher maximum output power per chip.

GaN-based high-power transistors are fabricated on silicon carbide (SiC) substrates. SiC is chemically inert and extremely hard. Even dry etching with state-of-the-art inductively coupled plasmas (ICP) requiring very robust etch masks reach only low etching rates of about $1 \mu\text{m}/\text{min}$. Therefore, economically reasonable alternatives are required for the fabrication of micro holes in SiC. Direct processing by laser ablation can provide an efficient solution for drilling micro holes in SiC.

Recently, FBH has developed a technology to form through micro vias in SiC using a nanosecond pulsed, frequency tripled Nd:YAG solid state laser. The laser beam exhibiting a Gaussian shaped intensity profile is moved on the sample in order to obtain a through hole of the desired diameter. Consequently, the contact pad on the front of the device obtains a hole. If necessary, this opening on the front can be avoided using an excimer laser with homogenized beam profile.

In 2008, a technology was developed to fabricate blind via holes for AlGaIn/GaN HEMTs (high-electron mobility transistors) on SiC. Firstly, the wafers are thinned to a thickness of $100 \mu\text{m}$ and covered by a protecting layer of indium tin oxide (ITO) on the backside. The subsequent process flow is schematically shown in fig. 1.

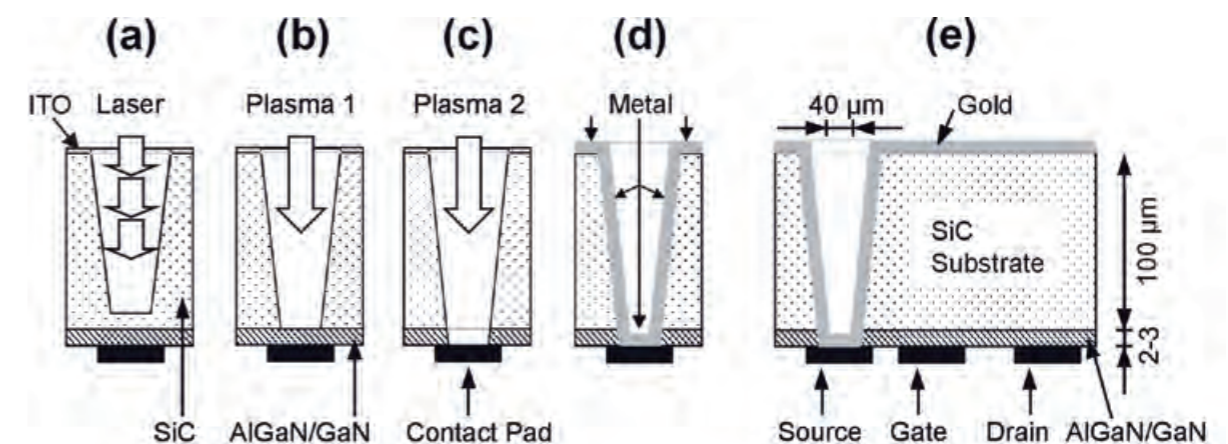


Abb. 1: (a)-(d) Prozessschritte der lasergestützten Herstellung von Sackloch-Vias, (e) schematische Darstellung des Querschnitts eines Transistors (Vorderseite unten) mit Vias zum Source-Kontakt. Fig. 1: (a)-(d) Process steps of laser-assisted formation of blind vias, (e) schematic of the cross section of a transistor (front facing down) having vias to the source contact.

Zum Laserbohren wird ein ArF-Excimerlaser verwendet, der Nanosekundenpulse bei einer Wellenlänge von 248 nm liefert und in ein kommerzielles Laser-Materialbearbeitungssystem (ILS500S-Air, InnoLas GmbH) integriert ist. Der Laserstrahl wird geformt und fokussiert, sodass sich auf der Probe der gewünschte Bohrquerschnitt einstellt. Zum Percussionsbohren wird der Laserstrahl nicht bewegt und so lange gebohrt, bis der Lochboden dicht an der Grenzfläche SiC/GaN liegt (Abb. 1a, 2a). Bei einer Energiedichte von etwa 20 J/cm^2 je Puls sind 250 - 300 Laserpulse notwendig, um die angestrebte Bohrtiefe von 80 - 100 μm zu erreichen. Damit ergibt sich bei 90 Hz Folgefrequenz eine Bohrzeit von etwa 3 s/Bohrung.

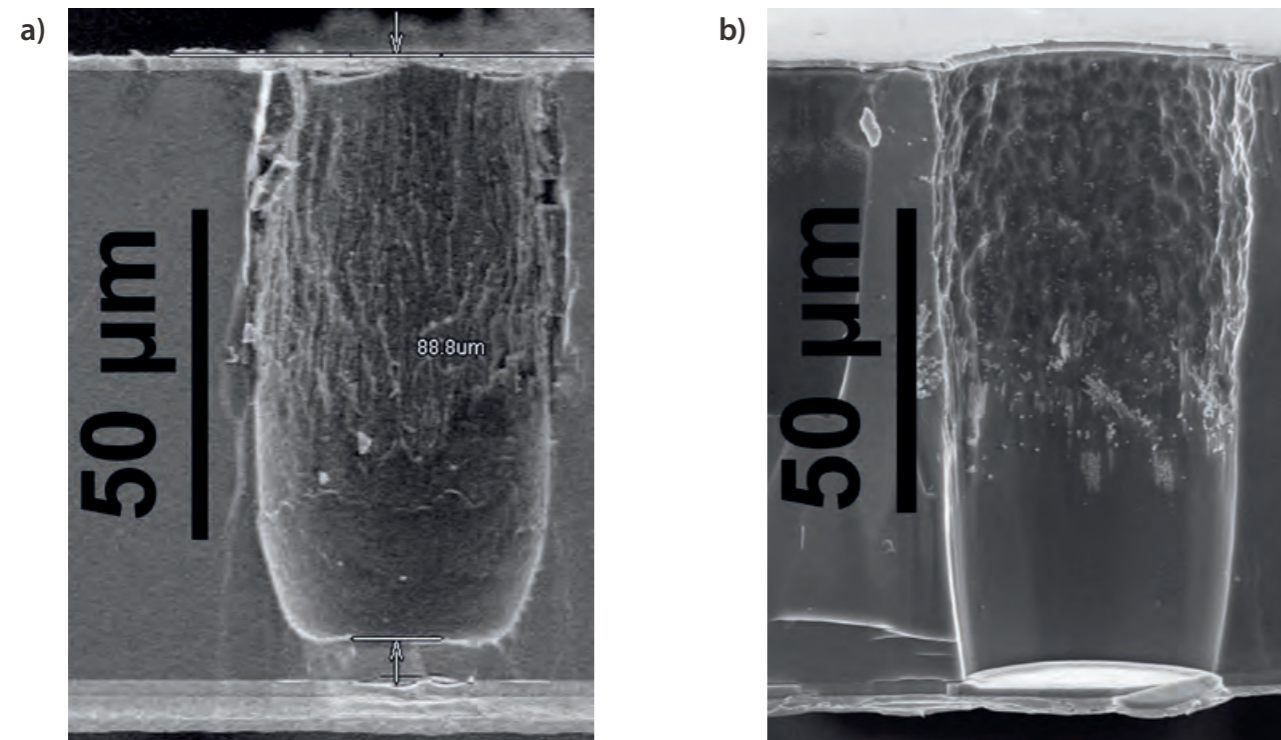


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts eines Vias in SiC (a) nach dem Laserbohren und (b) nach dem ersten Ätzschritt mit Stopp auf der GaN-Schicht.
Fig. 2: Scanning electron micrograph of the cross section of vias in SiC (a) after laser drilling and (b) after the first plasma etching that stops at the GaN layer.

Im nächsten Prozessschritt (Abb. 1b, 2b) erfolgt das Trockenätzen des restlichen SiC im ICP-Ätzer mit $\text{SF}_6\text{-O}_2$. Die Ätzselektivität zwischen SiC und GaN ist $>100:1$, sodass der Prozess an der Grenzfläche zum GaN praktisch zum Halt kommt. In einem zweiten Ätzschritt (Abb. 1c) wird die GaN-Schicht durch reaktives Ionenätzen (RIE) mit $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ entfernt. Die Ätzselektivität zwischen GaN und dem Vorderseiten-Kontaktmetall Platin ist $>10:1$ und ermöglicht einen sauberen Ätzstopp am Vorderseitenmetall. Nach nasschemischer Entfernung der ITO-Schutzschicht entsteht durch Abscheidung einer 5 μm dicken Goldschicht auf die Lochwände (Abb. 1d, 3) eine elektrische Verbindung zwischen den Kontaktflächen auf der Vorderseite und der rückseitigen Metallschicht. Die gemessenen Widerstände einzelner Vias hängen von der Dicke der Goldschicht und der Probe ab und liegen im Bereich von 10 - 30 $\text{m}\Omega$ (Abb. 4). Mit diesen Voraussetzungen erfolgt gegenwärtig die Integration in den Bauelementeprozess.

For laser drilling an ArF excimer laser is used that provides nanosecond pulses at a wavelength of 248 nm. The laser is integrated into a commercial laser workstation (ILS500S-Air, InnoLas GmbH). The laser beam is shaped and focused to obtain the desired via cross section on the sample. By percussion drilling, i.e., without moving the target, the hole is formed until the bottom of the hole is closed to the interface SiC/GaN (fig. 1a, 2a). At a laser fluence of about 20 J/cm^2 per pulse 250 - 300 laser shots are required to achieve a hole depth of 80 - 100 μm resulting in a drilling time of about 3 s per hole at a 90 Hz pulse repetition frequency.

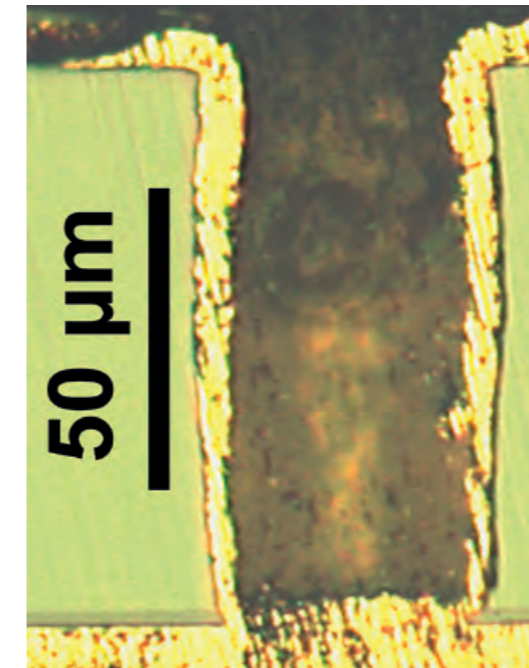


Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahme des Querschnitts eines Vias nach vollständiger Metallisierung.
Fig. 3: Optical micrograph of the cross section of a plated-through hole.

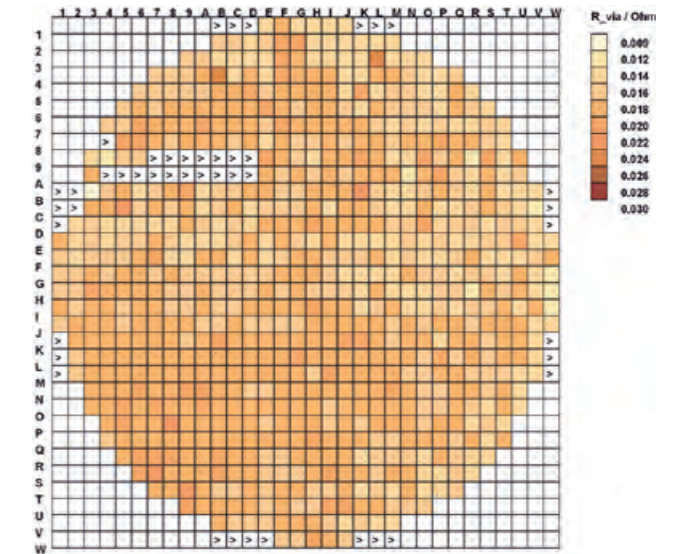


Abb. 4: Wafermap des Durchgangswiderstandes durch einzelne Vias. Die Messwerte liegen zwischen 10 und 30 $\text{m}\Omega$. An den mit „>“ markierten Messpositionen war kein Via vorhanden.
Fig. 4: Wafer mapping of the electrical resistance of single vias. The values range from 10 to 30 $\text{m}\Omega$. Positions marked with „>“ had no via.

Veröffentlichungen // Publications

O. Krüger, T. Wernicke, J. Würfl, R. Hergenröder, G. Tränkle, „Analysis of material modifications caused by nanosecond pulsed UV laser processing of SiC and GaN“, Appl. Phys. A 93 (2008) 85-91.

NETZWERKE
NETWORKS

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

Netzwerke: Technologietransfer sowie Aus- und Weiterbildung

Der 2007 eingerichtete Geschäftsbereich Netzwerke hat seine Aktivitäten in den beiden Schwerpunktfeldern Technologietransfer sowie Aus- und Weiterbildung in 2008 weiter ausgebaut. Der Fokus verlagerte sich dabei stärker auf die Vernetzung mit weiteren Forschungseinrichtungen sowie die Professionalisierung des Technologietransfers und der Verwertung. Weiterhin werden hier seit dem Aufbau des Geschäftsbereichs die Aktivitäten des Zentrums für Mikrosystemtechnik Berlin (ZEMI) koordiniert. Das Team des Geschäftsbereichs Netzwerke unterstützt zudem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Institut in der Zusammenarbeit mit Industriepartnern: von der Recherche, der gemeinsamen Vorbereitung und Abstimmungen von Besuchen bis hin zur Projektentwicklung. Auch die Planung und Durchführung von Veranstaltungen wie die Microsystems Summerschool Berlin, die bereits zum dritten Mal vom FBH organisiert und gemeinsam mit ZEMI-Partnern ausgerichtet wurde oder von thematischen Workshops, wie beispielsweise 2008 mit Unternehmensvertretern zum Thema Wide-Bandgap-Semiconductors, gehören zu den Aktivitäten des Geschäftsbereichs.

Im Tätigkeitsschwerpunkt Technologietransfer wurde im Rahmen von Leibniz-WideBaSe-Research die Zusammenarbeit mit regionalen Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Halbleiter großer Bandlücke (Al,Ga,In)N vorangetrieben. Gemeinsame Projekte wurden initiiert und parallel ein Unternehmensnetzwerk unter Mitwirkung des FBH entwickelt. Ein regionaler Wachstumskern zur gezielten Produktentwicklung in diesem Bereich ist unter dem Titel Berlin WideBaSe Applications in Vorbereitung.

Um Forschungsergebnisse aus Kooperationen mehrerer Institute nachhaltig zu verwerten, wurde Ende 2008 das Vorhaben „VALORES: Valorization of Research - Strategic Cooperation of Institutes“ gestartet. Mit VALORES bauen das FBH und das Institut für Niedertemperatur und Plasma-physik (INP) Greifswald ihre bereits erfolgreichen Verwertungsaktivitäten, beispielsweise bei Forschungsaufträgen, Ausgründungen oder Schutzrechten, weiter aus. Zudem werden institutsübergreifende Forschungsk Kooperationen wie „Mikroplasma für die Medizin“ initiiert.

Auch die Aktivitäten des zweiten Tätigkeitsschwerpunkts Aus- und Weiterbildung des Geschäftsbereichs Netzwerke waren überaus erfolgreich. So war das Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologien Berlin, das zusätzliche Ausbildungsplätze in Mikro-, Opto- und Nanotechnologie-Unternehmen und -Einrichtungen schaffen soll, in der ersten Phase so erfolgreich, dass es seine Zielvorgaben bereits im Herbst 2008 erfüllt hatte - daher wurde auch die Finanzierung um eineinhalb Jahre verlängert. Parallel wurde die Zusammenarbeit mit der Lise-Meitner-Schule, die zwischenzeitlich auch Partnerschule des Instituts geworden ist, bei der Aus- und Weiterbildung weiter ausgebaut.

Networks: Technology Transfer and Education & Training

The Business Area Networks, which was established in 2007, further expanded its activities in the two key areas Technology Transfer and Education & Training in 2008. The focus has shifted more on networking with other research institutions and towards professionalization of technology transfer and valorization. Furthermore the activities of the Center for Microsystems Technology Berlin (ZEMI) are coordinated here, since the group was set up. The Business Area Networks team also supports FBH's scientists with their cooperations with industrial partners, ranging from joint preparation and organization of visits to the development of projects. Also, the planning and realization of events are among the activities of the Business Area Networks. Examples are the Microsystems Summer School Berlin, now in its third year organized by the FBH and jointly held with ZEMI partners as well as thematic-oriented workshops, like the one held in 2008 on Wide-Bandgap-Semiconductors with company representatives.

Within the key area Technology Transfer, cooperations with regional research institutes in the field of wide bandgap semiconductors (Al,Ga,In)N were coordinated and intensified in the context of Leibniz-WideBaSe-Research. Joint projects between the institutes have been initiated and a business-driven network with the participation of the FBH has been developed. This network named Berlin WideBaSe Applications, a regional growth core focused on product development in this area, is currently under preparation.

To jointly valorize research results gained from cooperations between several institutions, the project „VALORES: Valorization of Research - Strategic Cooperation of Institutes“ was started at the end of 2008. With VALORES, the FBH and the Leibniz Institute for Plasma Science and Technology (INP) in Greifswald expand their already successful valorization activities, for example in research assignments, spin-offs and patents. Moreover, cross-institutional research collaborations, including „micro-plasmas for medical purposes“, shall be initiated.

Also the second key area Education & Training was very successful with its activities. The High-Technology Education Network Berlin (ANH Berlin), that aims to support companies by establishing additional apprenticeships in micro-, opto- and nanotechnology, in the initial phase already met its targets in autumn 2008. Due to these achievements, funding was extended for another one and a half year. In parallel, the cooperation in education and training with the Lise-Meitner-Schule, meanwhile also a partner school of the institute, was further expanded.

VALORES: Werte schaffen durch Forschungsverwertung

Wissen, Technologien und Forschungsergebnisse sind das Kapital jeder Forschungseinrichtung. Diese wertvollen Ressourcen werden häufig nicht strategisch und systematisch genug verwertet, um nachhaltige Synergien zwischen Forschung und Industrie zu schaffen. Zu diesem Zweck haben das FBH und das Greifswalder Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP) im Herbst 2008 das Vorhaben Valorization of Research Strategic Cooperation of Institutes (VALORES) gestartet. Industrielle Forschungsaufträge sollen damit weiter ausgebaut, Ausgründungen zum Erfolg geführt sowie Erfindungen geschützt und verwertet werden. In diesem Rahmen entstehen neue Konzepte, mit denen die Forschungen in beiden Instituten besser verwertet und auch institutsübergreifende Forschungsk Kooperationen erleichtert werden sollen. Darüber hinaus planen die beiden Einrichtungen neue gemeinsame Forschungsangebote für die Wirtschaft.

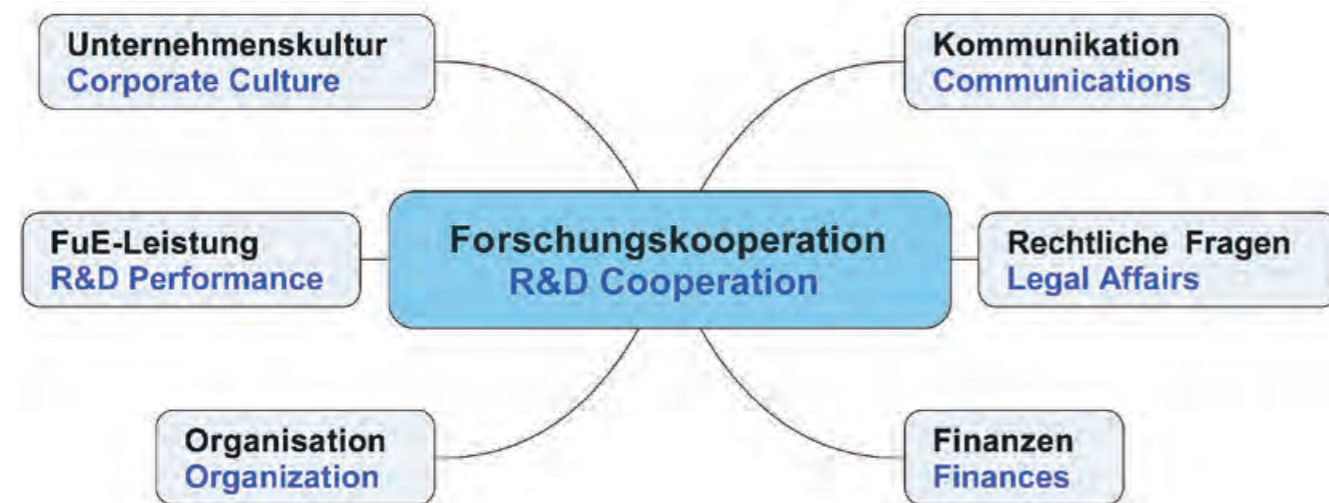


Abb. 1: Themenfelder bei Forschungskooperationen.
Fig. 1: Aspects of Research Cooperations.

Das im Rahmen des BMWi-Programms SIGNO geförderte Vorhaben koordiniert und intensiviert die jeweiligen Verwertungsaktivitäten von FBH und INP. Mittelfristig soll die Forschung der in den Bereichen Mikrowellentechnik, Optoelektronik und Plasmatechnologie agierenden Verbundpartner auf eine gemeinsam entwickelte Verwertungsstrategie abgestimmt werden. Die beiden Institute kooperieren dabei mit der Berliner ipal Gesellschaft für Patentverwertung mbH und der neoplas GmbH, Greifswald, um neben einem Schutzrechtsmanagement auch ihre nicht-schutzrechtsrelevanten Forschungsaktivitäten in die institutsübergreifende Verwertungsstrategie zu integrieren. Professionelle Verwertungsbüros sind an Bereichen wie Grundlagenforschung und nicht-schützbarem Know-how meist nicht interessiert. Da diese bei der Erfüllung der Forschungsaufträge der Institute jedoch eine zentrale Rolle spielen, setzen FBH und INP auf den Ausbau eigener Verwertungskompetenzen.

VALORES: Creating Value through Valorization

Know-how, technology and research results are the assets of every research institute. These valuable resources are often insufficiently enough utilized, both strategically and systematically. In order to develop sustainable synergies between research and industry, FBH and Leibniz Institute for Plasma Science and Technology (INP) in Greifswald started a project in fall 2008 - Valorization of Research - Strategic Cooperation of Institutes (VALORES). This project aims to expand industrial contract research, to bring start-ups on a successful path, as well as to protect and commercialize intellectual property. Within this framework, new concepts are to be established allowing for better utilization of research in the institutes and facilitating inter-institutional research. Additionally, both institutes plan novel cooperative research offers for the industry.

Funded by the BMWi Program SIGNO, VALORES coordinates and strengthens the respective commercialization activities of FBH and INP. A medium-term goal is to develop a joint commercialization strategy for the research activities of the project partners in microwave technology, optoelectronics and plasma technology. FBH and INP are cooperating with ipal GmbH in Berlin and neoplas GmbH in Greifswald in order to integrate both, their patent strategy and non-patentable research activities, into a comprehensive utilization strategy. As basic research and know-how play a central role in the research contracts of both institutes, FBH and INP will demonstrate own competencies in this field.

VALORES shall serve as a role model for other research institutes and in the medium term lead to cooperation with additional partners along the value chain. The new, jointly developed commercialization strategy is intended to initiate and build long-term partnerships with industry, leading

VALORES soll Modellcharakter für andere Forschungseinrichtungen haben und mittelfristig zu Forschungsk Kooperationen mit weiteren Partnern entlang von Wertschöpfungsketten führen. Mit der neuen, gemeinsam entwickelten Verwertungsstrategie sollen langfristige Partnerschaften insbesondere mit Industrieunternehmen initiiert und ausgebaut werden. Forschungsergebnisse der Verbundpartner können so wesentlich rascher in marktfähige Anwendungen überführt werden. Zugleich eröffnen sich damit für die Institute neue Handlungsspielräume in der Zukunft.

Mit dem Vorhaben VALORES werden die Kompetenzen der Institute im Technologietransfer personell ausgebaut und gestärkt. In einem ersten Arbeitsschritt erfolgte in Gesprächen auf Leitungsebene eine Bestandsaufnahme und Bewertung der vorhandenen Verwertungsaktivitäten in den Instituten. Darauf aufbauend wird eine SWOT-Analyse durchgeführt und ein Verwertungsleitfaden für strategische Forschungsk Kooperationen entwickelt.

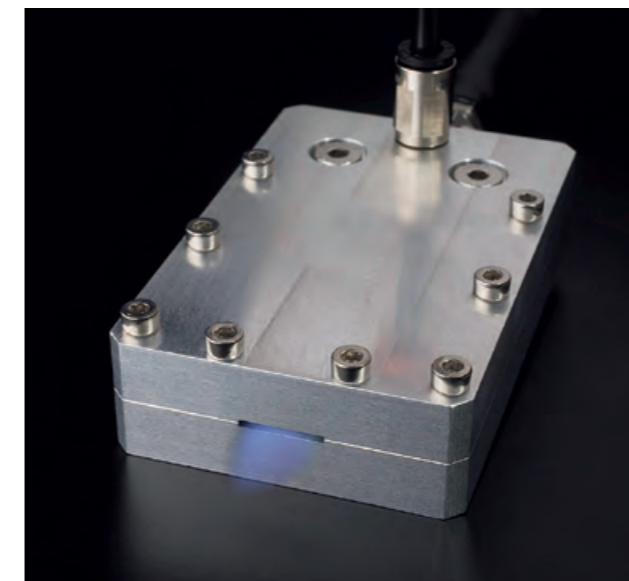


Abb. 2: Kleiner als eine Zigarettenschachtel und funktioniert an der normalen Umgebungsluft: Mikrowellenplasmaquelle aus dem FBH.
Fig. 2: Smaller than a cigarette package and operating in ambient air: microwave plasma source from the FBH.

significantly faster to marketable applications. The institutes also expect to gain more flexibility in this domain.

Within VALORES, technology transfer competencies in both institutes are staffed, hence expanded and strengthened. First steps involved discussions with group leaders in order to assess and evaluate current commercialization activities. Subsequently, a SWOT analysis was performed and utilization guidelines for strategic cooperative research are being developed.

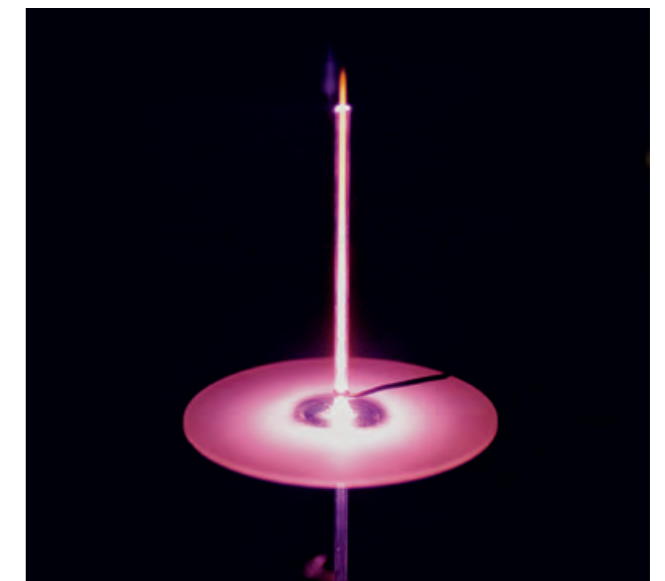


Abb. 3: Plasmajet des INP.
Fig. 3: Plasmajet of the INP.

Forschungsvernetzung mit Anwendungsnahe: Leibniz-WideBaSe-Research

Bereits 2007 wurde unter Federführung des FBH und des Leibniz-Instituts für Kristallzüchtung das verwertungsorientierte Netzwerk Leibniz-WideBaSe-Research initiiert. Ziele sind die Bündelung der regionalen Forschungskompetenzen im Bereich der Halbleiter großer Bandlücke (WideBaSe), die gemeinsame Abstimmung von Roadmaps sowie der Ausbau der Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen.

In 2008 wurden hierzu zwei Workshops mit Vertreterinnen und Vertretern aus acht unterschiedlichen Forschungseinrichtungen (Schwerpunkt Leibniz-Institute) aus Berlin und Brandenburg durchgeführt. Die Teilnehmenden - meist die Leiter der Einrichtungen - stellten aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich der breitlückigen Halbleiter vor. Bilateral wurden gemeinsame Forschungsprojekte abgestimmt, von denen erste, wie beispielsweise „Sensorkonzepte auf der Basis von Nitrid-Oberflächen“ gemeinsam mit dem ISAS (Institute for Analytical Sciences) bereits initiiert wurden.

Application-Based Networking in Research: Leibniz-WideBaSe-Research

Already in 2007, the utilization-oriented network Leibniz-WideBaSe-Research, which is coordinated by the FBH and the Leibniz-Institute for Crystal Growth, was initiated. Goals are to cluster regional research capabilities in the area of wide bandgap semiconductors (WideBaSe), jointly coordinate roadmaps and expand cooperation with regional companies.

In 2008, two workshops with representatives from eight different research institutes (main focus on Leibniz institutions) from Berlin and Brandenburg were held. The participants - mostly the directors of the institutes - presented current research activities within WideBaSe. Joint research projects were developed bilaterally and some of them have already been initiated, such as „sensor concepts based on nitride surfaces“ together with ISAS (Institute for Analytical Sciences).



MOVPE-Anlage für das Wachstum von (Al,Ga)N, die im Projekt genutzt wird.
MOVPE reactor for the growth of (Al,Ga)N which is used in the project.

Bei der Nachwuchsförderung beteiligten sich Partner des Netzwerks vor allem an zwei Sommeruniversitäten, der Photonics Summer School und der Microsystems Summer School Berlin. Durch wissenschaftliche Vorträge im Rahmen dieser Veranstaltungen konnten sich der wissenschaftliche Nachwuchs sowie Mitarbeiter/-innen regionaler Unternehmen über den aktuellen Stand und Perspektiven technologischer Entwicklungen im Bereich der Halbleiter großer Bandlücke informieren.

Parallel hierzu wurde, gesteuert durch das FBH, das regionale Unternehmensnetzwerk Berlin WideBaSe Applications initiiert. Zahlreiche kleine und mittelständische Unternehmen entwickeln und fertigen mittlerweile Produkte, die auf Forschungsergebnissen der in Leibniz-WideBaSe-Research vernetzten Einrichtungen basieren. Um die Forschungsaktivitäten noch stärker am Bedarf der Unternehmen auszurichten und im Bereich der Wide-Bandgap-Semiconductors eine regionale nutzbare Technologieplattform zu entwickeln, werden die Partner einen Antrag für einen Innovativen Regionalen Wachstumskern im Förderkonzept Unternehmen Region des BMBF stellen. Die erste Hürde hierfür konnte Ende 2008 bereits gemeistert werden; die Projektskizze sowie ein Bewerbungsgespräch im BMBF führten zu einer „sehr erfolgversprechenden“ Einstufung.

Basis für die geplante wirtschaftliche Verwertung sind die technologischen Entwicklungen zu Transistoren, LEDs im tiefen UV und Laserdioden im Materialsystem (Al,Ga,In)N (siehe Aktivitäten des Geschäftsbereichs GaN-Optoelektronik). Zum weiteren Ausbau und zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit in der Nitrid-Technologie wurde im Rahmen von Leibniz-WideBaSe-Research die Installation eines Epitaxiereaktors für 4"-Substrate vorbereitet.

Für 2009 wird neben der technologischen Weiterentwicklung die Definition eines Innovationskonzepts im Mittelpunkt stehen, um die Technologieplattform der WideBaSe bedarfsorientiert auszubauen.

In the promotion of young scientists, the network especially engaged in two summer universities, Photonics Summer School and Microsystems Summer School Berlin. Scientific presentations gave an overview on the current status and future prospects of technological developments in the field of WideBaSe to students, Ph.D. students, as well as staff from regional companies.

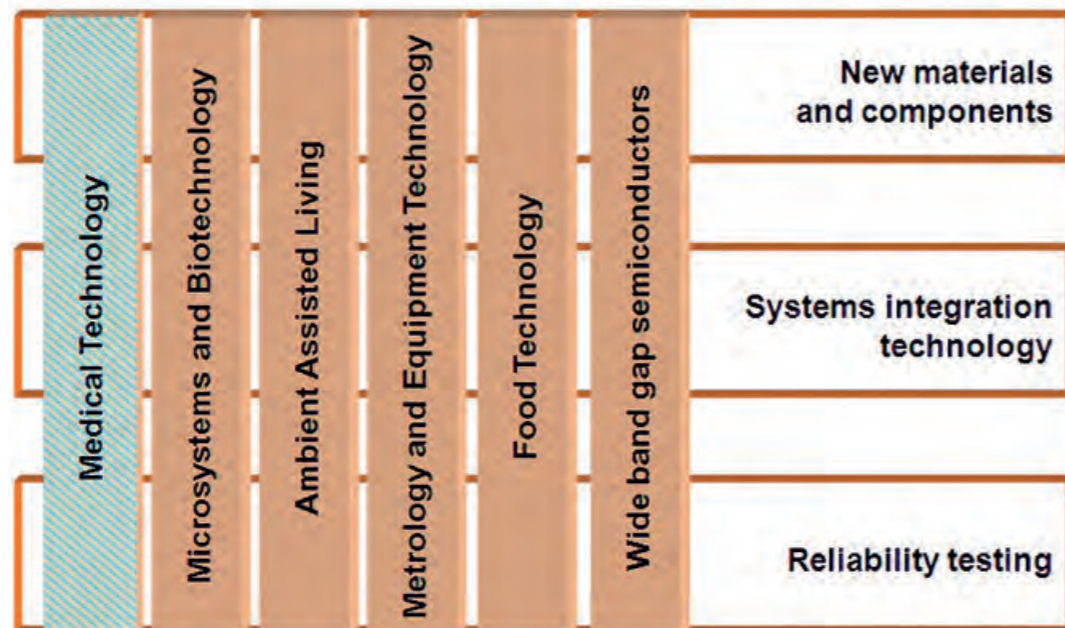
Parallel to these activities, the regional enterprise network Berlin WideBaSe Applications, headed by the FBH, was set off. Meanwhile, numerous small and medium-sized companies in the region develop and manufacture products based on research results of institutions cross-linked within Leibniz-WideBaSe-Research. To focus research activities even more on entrepreneurial needs and to develop a regionally usable technology platform within the WideBaSe field, the network partners will submit an application for the BMBF program „innovative regional centers of growth (Innovative regionale Wachstumskerne)“. The first step has already been successfully taken by end of 2008, when project outline and subsequent interview at the BMBF resulted in a „very promising“ rating.

Basis for the projected economic utilization are technological developments for transistors, LEDs in the deep UV, and laser diodes in the (Al,Ga,In)N material system (see activities of the GaN Optoelectronics Business Area). For further expansion and to secure competitiveness in nitride technology, a new reactor for epitaxy on 4" substrates was prepared for installation in the framework of Leibniz-WideBaSe-Research.

Besides technological advancement, further activities in cooperation with the enterprise-driven network Berlin WideBaSe Applications are planned for 2009, aiming to further expand the WideBaSe technology platform.

Die ganze Wertschöpfung: ZEMI leistet aktiven Technologietransfer in der Mikrosystemtechnik

Vom Systementwurf über Material- und Verfahrensentwicklung bis zu Funktions- und Zuverlässigkeitstests: Alle Stufen der Wertschöpfungskette bis hin zur Prototypenentwicklung und Kleinserienfertigung können durch das ZEMI - Zentrum für Mikrosystemtechnik Berlin abgedeckt werden. ZEMI, ein Verbund Berliner Forschungseinrichtungen, bündelt das regionale Forschungs- und Entwicklungspotenzial in der Mikrosystemtechnik (MST) und steht mit seiner Geschäftsstelle als zentraler Ansprechpartner für Industriekooperationen zur Verfügung. Es unterstützt vor allem kleine und mittelständische Unternehmen in der Region durch Know-how- und Technologietransfer. Im ZEMI arbeiten die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, das Ferdinand-Braun-Institut, das Fraunhofer IPK, das Fraunhofer IZM, das Helmholtz-Zentrum Berlin sowie die TU Berlin seit dem Jahr 2000 zusammen. Seit 2003 wird die Zusammenarbeit durch Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Geschäftsbereichs Netzwerke am FBH koordiniert.



Handlungsfelder für die Mikrosystemtechnik in Berlin-Brandenburg.
Operational fields for microsystems technology in Berlin-Brandenburg.

Aufgrund seiner umfassenden Aktivitäten hat sich ZEMI mittlerweile zum Sprachrohr der regionalen MST-Szene entwickelt. Gemeinsam mit den Optischen Technologien wurde die Mikrosystemtechnik als eines der fünf zentralen Kompetenzfelder für das Land Berlin identifiziert, die für Wirtschaftswachstum und Beschäftigung in der Region stehen - die Optischen Technologien und die Mikrosystemtechnik verzeichneten zusammen mit der Photovoltaik zwischen 2002 und 2007 einen Umsatzzuwachs von 1,28 Mrd. € auf 3,16 Mrd. €¹. Entsprechende strategische Ziele wurden in der vom Berliner Senat gemeinsam mit der IBB,

The Complete Value Added: ZEMI Provides Active Technology Transfer in Microsystems Technology

From system design via material and process development to functional tests: All stages of the value chain up to manufacturing of prototypes and small-scale production can be covered by the Center for Microsystems Technology Berlin (ZEMI). ZEMI is an association of research institutes in Berlin which pools the regional research and development potential in microsystems technology (MST). As a one-stop agency, ZEMI is the central contact for industry co-operation and particularly supports small and medium-sized companies in the region via know-how and technology transfer. Since 2000, the Federal Institute for Materials Research and Testing, the Ferdinand-Braun-Institut, the Fraunhofer IPK, the Fraunhofer IZM, the Helmholtz Centre Berlin and the TU Berlin have been working together within ZEMI. The cooperation is coordinated by FBH's Business Area Networks since 2003.

By now, ZEMI has emerged as spokesman for the regional MST scene due to its widespread activities. Together with optical technologies, microsystems technology has been identified as one of altogether five competence fields which stand for economic growth and employment in the Berlin region - optical and microsystems technologies together with photovoltaics announced an increase in turnover from 1,28 bn to 3,16 bn € between 2002 and 2007¹. Respective strategic objectives were drafted in the coherent innovation strategy for the Federal State of Berlin, which was established by the Senate of Berlin, IBB, IHK, and TSB.

der IHK und der TSB etablierten kohärenten Innovationsstrategie für das Land Berlin formuliert.

Im Rahmen der Innovationsstrategie haben die ZEMI-Partner die Handlungsfelder für die Mikrosystemtechnik in Berlin-Brandenburg herausgearbeitet, die von besonderer wirtschaftlicher Relevanz für die Region sind (siehe Abb.). In enger Zusammenarbeit mit Akteuren aus angrenzenden Technologiefeldern werden nun Maßnahmen entwickelt, die zum Ausbau des Kompetenzfelds beitragen. ZEMI arbeitet hier mit OpTecBB, dem Kompetenznetz für die Optischen Technologien, zusammen und unterstützt derzeit die Neufassung des Berliner Masterplans Optische Technologien und Mikrosystemtechnik. Die dabei aufgezeigten Handlungsfelder und Maßnahmen werden dokumentiert und dem Berliner Senat als Handlungsempfehlung übergeben. Günther Tränkle ist als Vorsitzender von OpTecBB e.V. Sprecher des Berliner Kompetenzfelds Optische Technologien und Mikrosystemtechnik.

In zentralen Handlungsfeldern wie der Lebensmitteltechnologie und dem Ambient Assisted Living (AAL) ist ZEMI bereits aktiv. Hier werden vom FBH beispielhafte Projekte initiiert und koordiniert. Um die Potenziale der MST für Lösungen in der Lebensmitteltechnologie besser zu nutzen, schlossen sich auf Initiative von ZEMI Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus den Bereichen Mikrosystemtechnik und Lebensmittelerzeugung und -verarbeitung zum Netzwerk EMiL-Net zusammen. EMiL steht für „Entwicklung von Mikrosystemtechnik für innovative Lebensmittelerzeugung“. Ein Ergebnis dieses Zusammenschlusses ist das Projekt FreshScan, in dem ein mobiler „Frischescanner“ für Fleisch entwickelt wird.

Beim AAL stellen sich ZEMI und zahlreiche weitere Akteure in der Region den Herausforderungen, die der demografische Wandel und die höhere Lebenserwartung der Menschen an Forschung und Entwicklung auch in den Hochtechnologien stellen. Gerade die Mikrosystemtechnik kann eine Reihe von unterstützenden Lösungen liefern, die Senioren befähigen, ihr Leben möglichst lange selbstbestimmt zu gestalten. Dazu werden auf europäischer und auf Bundesebene zahlreiche Programme, Initiativen und Netzwerke forciert. Im Verbundvorhaben MIDIS (Mikrosystemtechnische Dienstleistungs-Innovationen für Senioren) untersucht ZEMI, welche Potenziale in der Mikrosystemtechnik stecken, um im Zusammenwirken mit Dienstleistungen innovative Angebote für die ältere Generation zu entwickeln. MIDIS, ein Verbund von acht Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen aus den Bereichen Gesundheit, Finanzierung, Datenverarbeitung und Technologie, will auf Grundlage der ZEMI-Analyse bis zum Jahr 2011 neue Dienstleistungen entwickeln und auf den Markt bringen.

Literatur // Bibliography

¹ Report 2008/2009 Optische Technologien und Mikrosystemtechnik Berlin-Brandenburg; Technologiestiftung Berlin (Hrg.).

Within the framework of the innovation strategy, the ZEMI partners have defined the operational fields for microsystems technology in Berlin-Brandenburg which are particularly relevant for the regional economy (see fig. 1). Actions for developing the competence field will now be implemented in close collaboration with protagonists of related technologies. ZEMI cooperates with OpTecBB, the competence network for optical technologies, and currently supports the amendment of the master plan for optical and microsystems technologies in Berlin. The operational fields which have been identified will be documented and handed over to the Senate as recommended course of action. OpTecBB's chairman Günther Tränkle is also spokesman for the competence field „Optical and Microsystems Technologies“.

ZEMI already takes an active part in relevant operational areas like food technology and ambient assisted living (AAL). In these fields, FBH initiates and coordinates exemplary projects. On the initiative of ZEMI, companies and research institutes joined forces within microsystems technology and food production by initiating EMiL-NET. The network aims to open up the full potential of microsystems technology for innovative food production. One result of this association is the project FreshScan, in which a mobile scanner is being developed to detect the freshness of meat.

Within AAL, ZEMI and numerous other regional protagonists meet the challenge caused by demographic transitions and increased human life expectancy for research and development in high technology. Particularly, microsystems technology can provide a series of supportive solutions to enable seniors to live self-determinedly as long as possible. For this purpose, a considerable number of programs, initiatives and networks are accelerated on an European and a national level. In the joint research project MIDIS, ZEMI investigates the potential of microsystems technology to develop innovative services for senior citizens. MIDIS is an association of eight research institutes, universities and companies from health, finance, data processing and technology fields: Based on the ZEMI analysis, it aims to create and to launch new services by 2011.

Berufsorientierung und Vernetzung: Das Ausbildungsnetzwerk Hoch- technologie Berlin

Das seit Mai 2007 bestehende Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin (ANH Berlin), dessen Geschäftsstelle im Geschäftsbereich Netzwerke des FBH angesiedelt ist, hat sich die Sicherung des gewerblich-technischen Fachkräftenachwuchses im Raum Berlin für die Branchen Mikrosystemtechnik, Optische Technologien und Nanotechnologie zum Ziel gesetzt.

Durch praxisnahe Unterstützungsangebote wie Ausbildungsberatung und externes Bewerbungsmanagement konnten in den ersten eineinhalb Jahren bereits 34 zusätzliche Ausbildungsplätze geschaffen werden - die Zielgröße für zwei Jahre lag bei 30. Das Erfolgsrezept des Netzwerks liegt vor allem in der direkten - auch finanziellen - Einbindung der beiden Berufsschulen Lise-Meitner-Schule und Oberstufenzentrum für Informations- und Medizintechnik. So werden zwei Berufsschullehrer im Rahmen von ANH Berlin beschäftigt, wodurch Unternehmen bei der Schaffung und Vergabe von Ausbildungsplätzen optimal beraten werden und zugleich die betrieblichen Anforderungen direkt mit in den Unterricht einfließen.

Immer schwieriger für Betriebe gestaltet sich allerdings die Besetzung der Ausbildungsplätze mit adäquaten



Technik zum Anfasen: das Laserlabyrinth.
Living technology: the laser labyrinth.

Career Guidance and Networking: The High-Technology Education Network ANH Berlin

The High-Technology Education Network ANH Berlin which started in May 2007 and is managed by FBH's Business Area Networks aims to safeguard commercial and technical skilled trainees for Berlin's high-technology industries: microsystems, optical and nano technology.

By supporting companies with consulting services and external recruiting management, already in the initial phase 34 additional apprenticeships could be generated - 30 positions were initially projected. This success is mainly based on direct - also financial - integration of two vocational schools, Lise Meitner School and Oberstufenzentrum (vocational training college) for Information and Medical Technology. In order to optimally advise companies regarding all apprenticeship-related issues, two vocational school teachers are employed by ANH Berlin. At the same time, with this cooperation the demands of companies can be directly integrated into vocational training programs.

However, it is becoming increasingly difficult for companies to find suitable applicants for apprenticeship positions. This is basically due to the fact that occupational images in the high-tech fields are insufficiently known amongst young people. Particularly small companies only



Messestand bei den Tagen der Berufsausbildung.
Booth at the apprenticeship days.

Bewerbern/-innen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass Ausbildungsberufe in Hochtechnologien bei jungen Menschen nicht hinreichend bekannt sind. Zudem gehen insbesondere bei kleineren Betrieben nur wenige Bewerbungen von geeigneten Kandidaten/-innen ein. Das ANH Berlin setzt daher auf eine verstärkte Berufsorientierung für Schüler/-innen. So bietet das ANH Berlin, u. a. in Kooperation mit dem Berufsinformationszentrum der Agentur für Arbeit, Informationsveranstaltungen zu Ausbildungs- und Karrieremöglichkeiten in den Hochtechnologien an. In diesem Rahmen öffnet auch das FBH für Schülerinnen und Schüler seine Türen und informiert vor Ort über die Mikrotechnologie-Ausbildung am Institut. Neben der Ausbildungsleiterin Marlies Gielow stehen Mikrotechnologie-Auszubildende für Fragen rund um die Berufsausbildung bereit. Die anschließende Reinraumführung bietet den jungen Menschen einen Einblick in die praktische Arbeit am Institut. Des Weiteren wirbt das ANH Berlin auf Messen, wie beispielsweise den Tagen der Berufsausbildung, für die freien Ausbildungsplätze der Kooperationsbetriebe und informiert Schüler/-innen, Eltern und Lehrkräfte über die vielfältigen Ausbildungsberufe und Zukunftsperspektiven in den Hochtechnologien.

Um auch bei den Betrieben und Multiplikatoren/-innen (Lehrkräfte, Berufsberater/-innen, Eltern) ein Bewusstsein für die Berufsorientierung in gewerblich-technischen Ausbildungsberufen zu schaffen, erweitert das ANH Berlin seine Netzwerkaktivitäten. So beteiligt sich das ANH Berlin an regionalen Initiativen wie dem regelmäßig stattfindenden Runden Tisch in der Hermann-von-Helmholtz-Schule. Dort tauschen Betriebe, Jugendberatungen, die Elternvertretung, die Agentur für Arbeit und die Lehrkräfte der Schule ihre Erfahrungen aus und beraten über erfolgversprechende Kooperationen, die Förderung von (benachteiligten) jungen Menschen und die passgenaue Vermittlung von Auszubildenden.

Aufgrund seiner erfolgreichen Arbeit wurde das ANH Berlin-Vorhaben Anfang 2009 bis zum 30.09.10 verlängert und wird weiter im Rahmen des JOBSTARTER-Programms aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und dem Europäischen Sozialfonds der Europäischen Union gefördert.

receive very few applications from eligible candidates. To help increasing the level of information, ANH Berlin focuses on intensified career guidance for pupils. Hence, the network organizes events, occasionally in cooperation with the job information center of the Federal Employment Agency, to advise pupils about education and career opportunities in high technology. FBH additionally offers open house days for pupils informing them about apprenticeship opportunities at the institute. During the program, Training Manager Marlies Gielow as well as current apprentices answer all questions concerning vocational education. The subsequent cleanroom tour provides an insight view into practical work at the institute. ANH Berlin also promotes apprenticeship vacancies of cooperating companies and informs pupils, parents and teachers about the multifaceted jobs and future prospects in high technology at e.g. fairs and apprenticeship days.

ANH Berlin also expands its activities towards raising awareness among companies and multipliers (teachers, vocational counselors, parents) on occupational orientation in technical jobs. It plays an active role in regional initiatives such as regular round tables at the Hermann-von-Helmholtz School. This initiative brings together companies, youth consultations, parents associations, job centers of the Federal Employment Agency and teachers in order to exchange experience and discuss cooperation opportunities as well as support for (disadvantaged) young people and optimal placement of apprentices.

Due to ANH Berlin's successful activities, the funding of the project was extended in the beginning of 2009 until September 2010 and is thus continued to be supported by the JOBSTARTER program of the Federal Ministry for Education and Research and the European Social Fund of the European Union.

Netzwerke AUNET und MANO erfolgreich in der Fachkräftesicherung

Auch im vergangenen Jahr haben die seit 2002 bzw. 2004 vom FBH koordinierten Bildungsnetzwerke MANO (Mikrosystemtechnik - Ausbildung in Nord-Ostdeutschland) sowie das deutschlandweite Netz der regionalen Mikrosystemtechnik-Netze AUNET (Aus- und Weiterbildungsnetzwerke für die Mikrosystemtechnik) ihre Arbeit erfolgreich fortgesetzt.

MANO hat mit der Gründung des Vereins proMANO und des hiermit verbundenen Engagements einzelner Akteure eine Grundlage zur Verstärkung der Netzwerkaktivitäten geschaffen. In 2008 wurden erstmals auch Ausbildungsbetriebe für den Verein gewonnen. Mehrere Partnerinstitutionen des Ausbildungsverbands Mikrotechnologie Berlin-Brandenburg sind beigetreten und gewährleisten damit auch nach Ende der MANO-Förderung die Finanzierung der Koordinationsleistungen für den Ausbildungsverbund. Die Zusammenarbeit wird künftig gemeinsam vom Netzwerk, dem Verein und dem Oberstufenzentrum Lise-Meitner-Schule gesichert. Die Lise-Meitner-Schule ist sowohl die zuständige Berufsschule für die Mikrotechnologie-Ausbildung als auch Partnerschule des FBH.



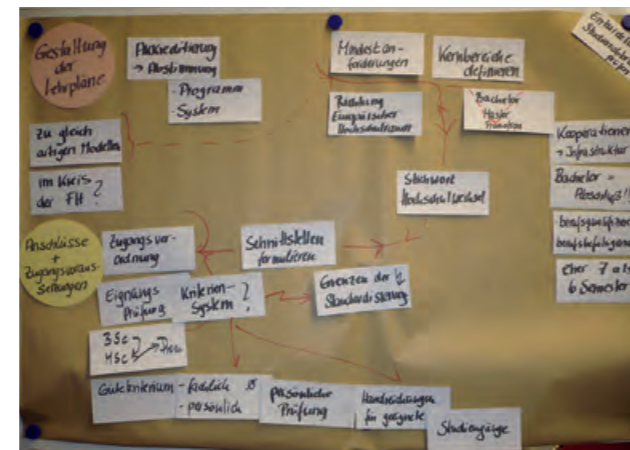
Eröffnungsvortrag zur Veranstaltung „Work in Progress - Runder Tisch Mainz“. Key speech of congress „Work in Progress - Round Table Mainz“.

Im Rahmen von AUNET wurden 2008 zwei zentrale Veranstaltungen durchgeführt. Der „Runde Tisch Nicht-akademische Aus- und Weiterbildung in Nano- und Mikrotechnologie“ fand als Folgeveranstaltung des 2007 vom FBH-Geschäftsbereich Netzwerke organisierten Kongresses „Aus- und Weiterbildung in Hochtechnologiefeldern“, statt. Die Akteure der Nanotechnologie-Szene erkannten hier die Chance, von der langjährigen Arbeit im Bereich der Mikrosystemtechnik-Aus- und Weiterbildung nachhaltig zu profitieren. Daher tagte die Expertenrunde am 29. und 30. Oktober im rheinland-pfälzischen Wirtschaftsministerium in Mainz. Moderiert wurde die Veranstaltung durch den Leiter des Geschäftsbereichs

AWNET and MANO Successfully Ensure Supply with Skilled Employees

MANO (Microsystems Education in Northeast Germany) and the German-wide association of regional microsystems networks AUNET (Education and Training Networks for Microsystems Technology) continued their successful work in the past year. Both education networks are coordinated by the FBH.

Already in recent years, the formation of the incorporated society proMANO and the dedicated involvement of individual players from the network, has enabled MANO to provide a solid basis for sustainable network activities. In 2008, for the first time apprenticeship companies could be won to support proMANO's work. Several partner institutions from the Apprenticeship Association Microtechnology Berlin-Brandenburg joined the society in order to further assure coordination services for the Apprenticeship Association even after termination of MANO's public funding. In the future, the cooperation will be continued by MANO, proMANO and the Lise-Meitner-School, which is both, the responsible school for vocational training and a partner school of the FBH.



Ergebnisse aus dem Forumstag zur Hochschulausbildung in der Mikrosystemtechnik. Results of Forum Days on Higher Education in Microsystems Technology.

Within the framework of AUNET, in 2008 two central events were executed. The „Round Table non-academic Education and Training in Micro and Nano Technology“ took place as a result of the congress „Education and Training in High Technology Areas“, which had been organized by FBH's Business Area Networks in 2007. The event clearly revealed the chance to sustainably benefit from the long-term work in the field of microsystems technology education and training. Thus, the expert panel consisting of players from the nanotechnology scene met on 29th and 30th October in the Rhineland-Palatinate Ministry of Economic Affairs in Mainz. This event was moderated by the Head of the Business Area Networks Nicolas Hübener.

Netzwerke Nicolas Hübener. Als Ergebnis der intensiven und konstruktiven Gespräche wurde sowohl die Einrichtung einer Arbeitsgruppe für die Erstausbildung in der Nanotechnologie als auch der regelmäßige Dialog zwischen den relevanten Akteuren der Hochtechnologien vereinbart.

Der ebenfalls durch die AUNET-Geschäftsstelle am FBH organisierte Forumstag zur Hochschulausbildung in der Mikrosystemtechnik beschäftigte sich in diesem Jahr mit der Anerkennung der Bachelor- und Masterabschlüsse durch die Industrie sowie die damit verbundenen Herausforderungen für die Hochschulen. Diskutiert wurden vor allem die Akkreditierung der Studiengänge, die einer flexiblen Gestaltung der Lehrpläne entgegensteht, sowie die Definition von Mindestanforderungen für Mikrosystemtechnik-Studiengänge. Die knapp 25 Teilnehmenden (größtenteils Professorinnen und Professoren) verständigten sich auf einen zeitnahen weiteren Austausch, der anhand konkreter Fragestellungen in Arbeitsgruppen stattfinden soll.

Um trotz auslaufender Förderung AUNET und das hierbei entstandene deutschlandweite Netzwerk in der Hochtechnologie-Aus- und Weiterbildung fortführen zu können, wurde durch einige Akteure ein Antrag zur webbasierten Lehre eingereicht. Dadurch könnten Lehrende und Lernende in der Mikrotechnologie von den entwickelten Materialien und den jahrelangen Erfahrungen der Partner aus AUNET weiter profitieren.

As a result of the intensive and constructive talks, participants agreed to establish a working group for initial training in nanotechnology as well as to set off a regular dialogue between key players within high technologies.

The other relevant event organized by AUNET in 2008, was the „Forum on Higher Education in Microsystems Technology“, which concentrated on the acceptance of Bachelor and Master degrees by industry and thus related challenges for universities. In particular two issues were discussed, the accreditation of courses of studies which hampers flexible arrangement of curricula and the definition of minimum requirements for courses in microsystems technology. The nearly 25 participants (mostly professors) agreed to continue exchanging experiences within a narrow time frame. Discussions shall be organized in working groups dealing with target-oriented issues.

To carry on successful work of the German-wide network of education and training in high technologies despite expiry of public funding, an application for web-based teaching was submitted by AUNET players. Thus, teachers and learners in microtechnology could further benefit from the long-term experience of the AUNET partners and the access to material developed.

IMPRESSUM // IMPRINT

Ferdinand-Braun-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

David Ausserhofer (p. 31)

DLR (p. 25)

HU Berlin (p. 85)

INP (p. 115 [fig.3])

Märkisches Museum Berlin (p. 30 [2])

Marion Schönenberger (p. 2, 24, 29 [1, 2])

Steffen Schulz (p. 9)

Bernhard Schurian (p. 10 [1-3], 12 [1-3], 22, 23,

46 [fig.1], 73, 75, 79, 80, 83, 94, 115 [fig. 2])

ZEMI (p. 27, 117)

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 für Höchstfrequenztechnik, Berlin 2009