

The logo for FBH (Fédération Belge de Hockey) is displayed in white on a blue, trapezoidal background. The letters 'F', 'B', and 'H' are rendered in a bold, sans-serif font. The 'F' and 'B' are solid white, while the 'H' is a hollow outline. The blue background is tilted, creating a dynamic, angular effect.

FBH

Jahresbericht 2007 // Annual Report 2007



2007 war für das Ferdinand-Braun-Institut von der Evaluierung durch den Senat der Leibniz-Gemeinschaft im Frühjahr bestimmt. Ende des Jahres zeichnete sich eine exzellente Beurteilung durch das externe wissenschaftliche Gremium ab. Der mittlerweile vorliegende Bericht bewertet das Ferdinand-Braun-Institut als eine der leistungsfähigsten III/V-Halbleiter-Kompetenzzentren in Europa mit hoher internationaler Sichtbarkeit. Insbesondere die exzellente Qualität der Forschung und die wichtige Funktion des FBH in der vorindustriellen Entwicklung besitze Vorbildcharakter. Ohne Einschränkungen und Auflagen wurde das FBH daher zur weiteren Förderung empfohlen. Über dieses herausragende Ergebnis freuen wir uns sehr und möchten an dieser Stelle allen an der Evaluierung Beteiligten für ihr Engagement danken.

Darüber hinaus prägte im vergangenen Jahr der Umbau der Organisationsstruktur das Institut und seine Mitarbeiter. Aufgrund des großen Erfolges des FBH in

2007 was strongly influenced by the evaluation of the Ferdinand-Braun-Institut in spring. By end of the year, the external scientific board conducted by the Senate of the Leibniz Association signaled that FBH was excellently evaluated. Meanwhile, the report is available saying that the Ferdinand-Braun-Institut is one of the most capable and internationally highly visible centers of competence for III-V semiconductors in Europe. Especially the excellent quality of its research and FBH's important function in pre-industrial development has to be seen as a role model. Thus, FBH was recommended for further funding without any restrictions. We are delighted about that outstanding result and want to thank all parties involved in the evaluation process for their dedicated contribution.

In addition, the past year was characterized by reforming FBH's organizational structure. As a consequence of the institute's great success in applica-

der anwendungsorientierten Forschung ist die Mitarbeiterzahl seit Jahren stetig angewachsen – allein von 2006 auf 2007 stieg die Zahl der Kolleginnen und Kollegen von 180 auf 210. Darauf hat das Ferdinand-Braun-Institut mit der Einführung einer Matrixstruktur reagiert und zusätzlich zu den vier wissenschaftlichen Abteilungen fünf Geschäftsbereiche neu geschaffen. Damit sichert das Institut das weitere Wachstum und präsentiert sein Leistungsspektrum und seine Angebote für Kunden aus Forschung und Industrie transparent nach außen.

In diese Struktur wurden auch die 2006 begonnen Hochschulkoperationen eingebunden. Die Zusammenarbeit mit dem Professor der TU Berlin Michael Kneissl wurde mit dem Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik strukturell verankert und weiter intensiviert. Sie war so erfolgreich, dass derzeit weitere, vergleichbare Kooperationen mit Professoren der Berliner Humboldt-Universität und der Technischen Universität Berlin in den Bereichen Lasermetrologie und Mikrowellentechnik sowie eine Stiftungsprofessur zur Terahertztechnologie gemeinsam mit dem Oerlikon-Konzern vorbereitet werden.

Mit diesen strukturellen Weichenstellungen sowie den exzellenten Forschungsergebnissen und innovativen Entwicklungen im letzten Jahr blicken wir optimistisch in die Zukunft. Unser Dank gilt dabei sowohl unseren Kooperationspartnern aus Forschung und Industrie als auch unseren Geldgeber von Land Berlin und Bund. Ohne deren Unterstützung wären weder zukunftsweisende Technologieentwicklungen noch explorative Projekte möglich. Nicht zuletzt möchte ich unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern meinen Dank aussprechen, die mit ihrem Einsatz und ihrem Wissen einen wesentlichen Anteil am Erfolg des FBH haben. Ich freue mich darauf, die weitere Zukunft mit Ihnen gemeinsam gestalten zu können und wünsche Ihnen eine anregende Lektüre der hier zusammengestellten Entwicklungen des vergangenen Jahres.

Ihr

Günther Tränkle

tion-oriented research, the number of employees constantly increased within the last years – only from 2006 to 2007, workforce rose from 180 to 210. Hence, FBH introduced a new matrix structure and built up five new business areas in addition to the four existing scientific departments. The institute thus prepares for the further conceivable growth and clearly represents the service portfolio and its products.

Furthermore, an integral part of this structure are co-operations with universities, which have been first initiated in 2006. The collaboration with TU Berlin's Michael Kneissl has been further intensified and structurally fixed in FBH's new Business Area GaN Optoelectronics. This form of joint research was so successful, that further comparable co-operations with professors of the Berlin Humboldt University and TU Berlin in the fields of laser metrology and microwave technologies are currently prepared as well as a joint foundation professorship in terahertz technology, supported by the Oerlikon Group.

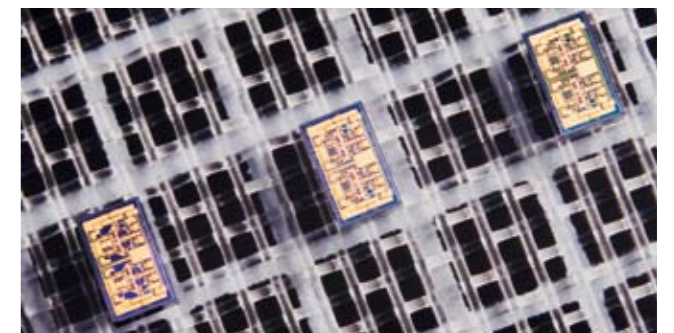
By setting the course with structural reorganization as well as with excellent research results and innovative developments within the past year, we feel very optimistic about future. In this regard, we would like to express our gratitude to our partners in research and industry as well as to the State of Berlin and Federal Government for basic funding. Without their support neither trendsetting technology development nor explorative projects would be possible. Last but not least, I would like to thank all our colleagues who play an integral role in FBH's success with their involvement and their know-how. I am looking forward to jointly create future and wish you an inspiring lecture of last year's developments compiled here.

Best regards,

Günther Tränkle

PROFIL PROFILE	8			
SCHLAGLICHTER HIGHLIGHTS	20			
GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH	41			
MIKROWELLENKOMponentEN UND -SYSTEME MICROWAVE COMPONENTS AND SYSTEMS	42	Einführung Introduction		
	43	Klasse-S-Schaltverstärker Class S Amplifiers		
	46	Plasmaquellen Plasma Sources		
	51	TS-THz-Transistoren TS THz Transistors		
	54	Fortschritte in FDFD-EM-Simulation Progress in FDFD EM Simulation		
	58	Transistor-Modellierung Transistor Modeling		
GAN-ELEKTRONIK GAN ELECTRONICS	64	Einführung Introduction		
	65	Hochspannungs-GaN-HEMTs High-Voltage GaN HEMTs		
	71	GaN-HEMT Zuverlässigkeit GaN HEMT Reliability		
	74	Selbstsperrende GaN-Transistoren Normally-Off GaN Transistors		
DIODENLASER DIODE LASERS	80	Einführung Introduction		
	81	Leistungsstarke 980 nm BA-Laser Powerful 980 nm BA Laser		
	84	Hocheffiziente 808 nm Barren Highly Efficient 808 nm Bars		
	87	Kurzpuls laser mit 1 W/μm Short-Pulse Laser with 1 W/μm		
	89	Grundmode-Laser Fundamental Mode Laser		
	93	Effiziente Frequenzverdoppelung Efficient Frequency Doubling		
	97	Blauer Laser für Displays Blue Laser for Displays		
	101	Mikrosystem-Laser zur Spektroskopie Microsystem Laser for Spectroscopy		
	104	DFB-Laser für Atomuhren DFB Laser for Atomic Clocks		
	110	Einführung Introduction	GAN-OPTOELEKTRONIK GAN OPTOELECTRONICS	
	111	InGaN-MQW-Laser InGaN MQW Laser		
	113	LEDs im nahen UV Near UV LEDs		
	118	Einführung Introduction	MATERIALIEN UND PROZESSE MATERIALS AND PROCESSES	
	119	GaN-HVPE GaN HVPE		
	123	Nicht- und semipolares GaN Non- and Semipolar GaN		
	126	AlN-MOVPE AlN MOVPE		
	130	Einführung Introduction	NETZWERKE NETWORKS	
	131	Aktiv in der Bildung Active in Education		
	136	Erfolgreicher Transfer Successful Transfer		

**PROFIL
PROFILE**



Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik erforscht Schlüsseltechnologien in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Es realisiert Höchstfrequenz-Bauelemente und Schaltungen für die Kommunikationstechnik und Sensorik. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser entwickelt das Institut für die Materialbearbeitung, Lasertechnologie, Medizintechnik und Präzisionsmesstechnik. Für künftige Anwendungen führt das FBH grundlegende Untersuchungen an Nitriden durch, beispielsweise für die Realisierung von kurzweiligen UV-Lichtquellen oder Transistoren für sehr hohe Spannungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Kompetenzzentrum für III/V-Verbindungshalbleiter. Es betreibt industriekompatible und flexible Reinraumlaborare mit Gasphasen-Epitaxieanlagen und einer III/V-Halbleiter-Prozesslinie. Das FBH verfügt über eine sehr gute Material- und Prozessanalytik, eine umfassende Bauelemente-Messtechnik und hervorragende Werkzeuge für Simulation und CAD. Seine Forschungsergebnisse setzt es in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen erfolgreich durch Spin-offs.



The Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik explores cutting-edge technologies in the fields of microwaves and optoelectronics. It develops high-frequency devices and circuits for applications in communications and sensor technology. High-power diode lasers with excellent beam quality are produced for materials processing, laser technology, medical technology and high precision metrology. FBH also conducts basic investigations on nitrides for future applications such as short-waved UV light sources or transistors for very high voltages.

The FBH is an internationally recognized competence center for III-V compound semiconductors. It operates industry-compatible and flexible clean room laboratories with vapor phase epitaxy units and a III-V semiconductor process line. The work relies on comprehensive materials and process analysis equipment, a state-of-the-art device measurement environment, and excellent tools for simulation and CAD. In close cooperation with industry, its research results lead to cutting-edge products. The FBH also succeeds in turning innovative product ideas into spin-off companies.

Leitbild

Mission Statement

Geschäftsbereiche & Forschung

Business Areas & Research

... 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.

... 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.

Mikrowellenkomponenten und -systeme

- Frontends bis 80 GHz
- Leistungsverstärker bis 10 GHz
- Low-Noise-Komponenten
- Mikroplasmen

GaN-Elektronik

- Mikrowellentransistoren & MMICs
- Leistungselektronik

Diodelaser

- Breitstreifen & Barren (Spektralbereich – 0,6 - 1,2 μm)
- Hochbrillante Laser (Linienbreiten < 10 MHz)
- Hybride Lasersysteme
- Lasersensorik
- Lasermetrologie

GaN-Optoelektronik

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

Material- und Prozesstechnologie

- GaN-HVPE
- Lasermikrostrukturierung

Netzwerke

- Bildung
- Transfer

Microwave Components and Systems

- Front ends up to 80 GHz
- Power amplifiers up to 10 GHz
- Low-noise components
- Microplasmas

GaN Electronics

- Microwave transistors & MMICs
- Power electronics

Diode Lasers

- Broad area lasers & bars (spectral range – 0.6 - 1.2 μm)
- High-brightness lasers (line width < 10 MHz)
- Hybrid laser systems
- Laser sensors
- Laser metrology

GaN Optoelectronics

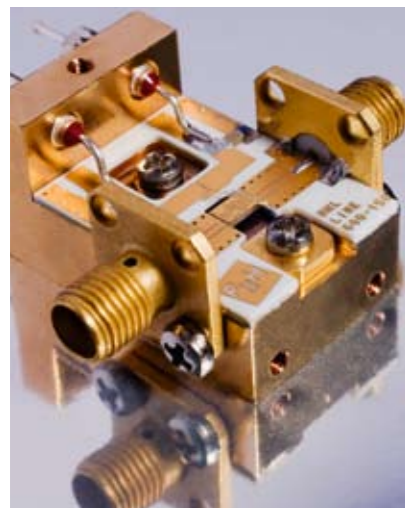
- UV high-power laser diodes
- Blue & green laser diodes
- UV LEDs

Materials and Process Technology

- GaN HVPE
- Laser micro processing

Networks

- Education & training
- 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
- Microwave plasmas
- Electromagnetic simulation
- Microwave measurement and device characterization

High-Power Diode Lasers and LEDs

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

Processes and Materials

- Development and implementation of semiconductor processes (especially III-V semiconductors)
- Epitaxial growth of customized III-V semiconductor layers



Kontakt // Contact

Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik im Forschungsverbund Berlin e.V.

Gustav-Kirchhoff-Straße 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. habil. 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.erbert@fbh-berlin.de
Mikrowellentechnik / Mikrowellenkomponenten & -systeme Microwaves / Microwave Components & Systems	Prof. Dr.-Ing. habil. 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 Forschungsverbund
Berlin e.V.**

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

Forschungsverbund Berlin e.V.

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

■ **The Forschungsverbund
Berlin e.V.**

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

Forschungsverbund 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

2006

Mitarbeiter

180 (160 Mitarbeiter + 20 studentische Hilfskräfte)

Umsatz

- Grundfinanzierung durch das Land Berlin und den Bund (9,3 Mio. Euro)
- Öffentliche Drittmittel (3,0 Mio. Euro)
- Industrielle Auftragsforschung (2,6 Mio. Euro)

2007

Mitarbeiter

210 (185 Mitarbeiter + 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

2006

Staff

180 (160 employees + 20 student assistants)

Budget

- Basic funding: State of Berlin & Federal Government (9.3 Mio. Euro)
- Public project funding (3.0 Mio. Euro)
- Industrial contracts (2.6 Mio. Euro)

2007

Staff

210 (185 employees + 25 student assistants)

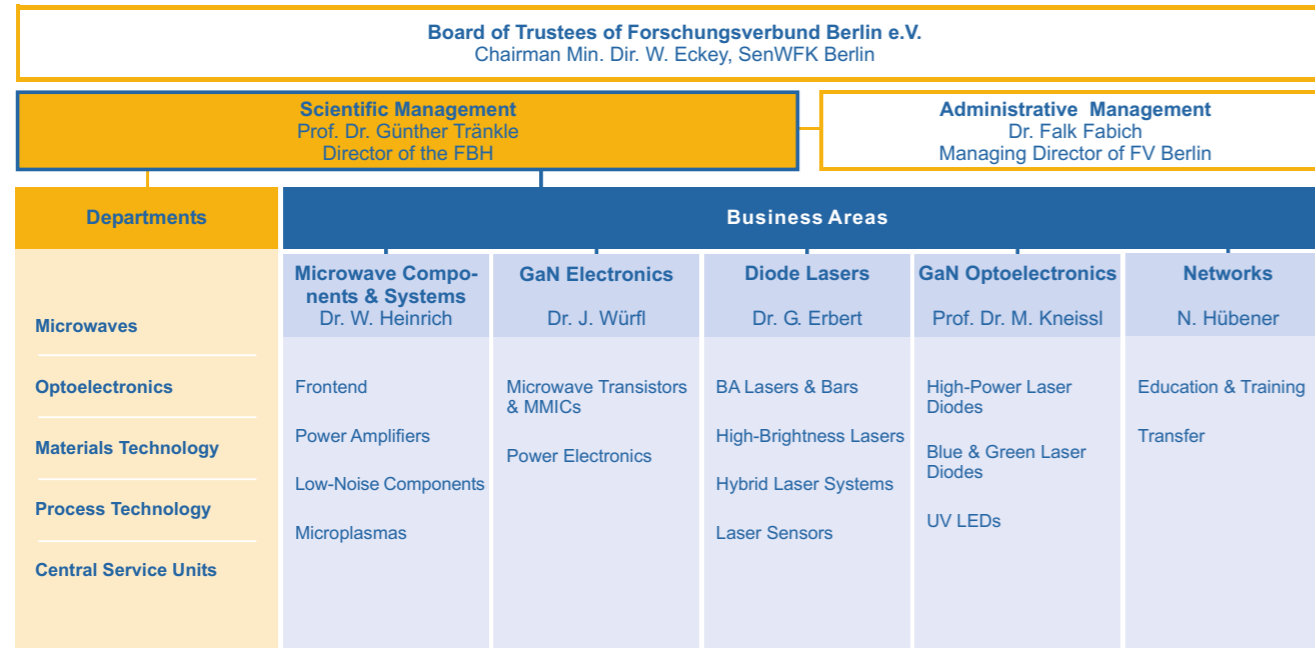
Umsatz

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

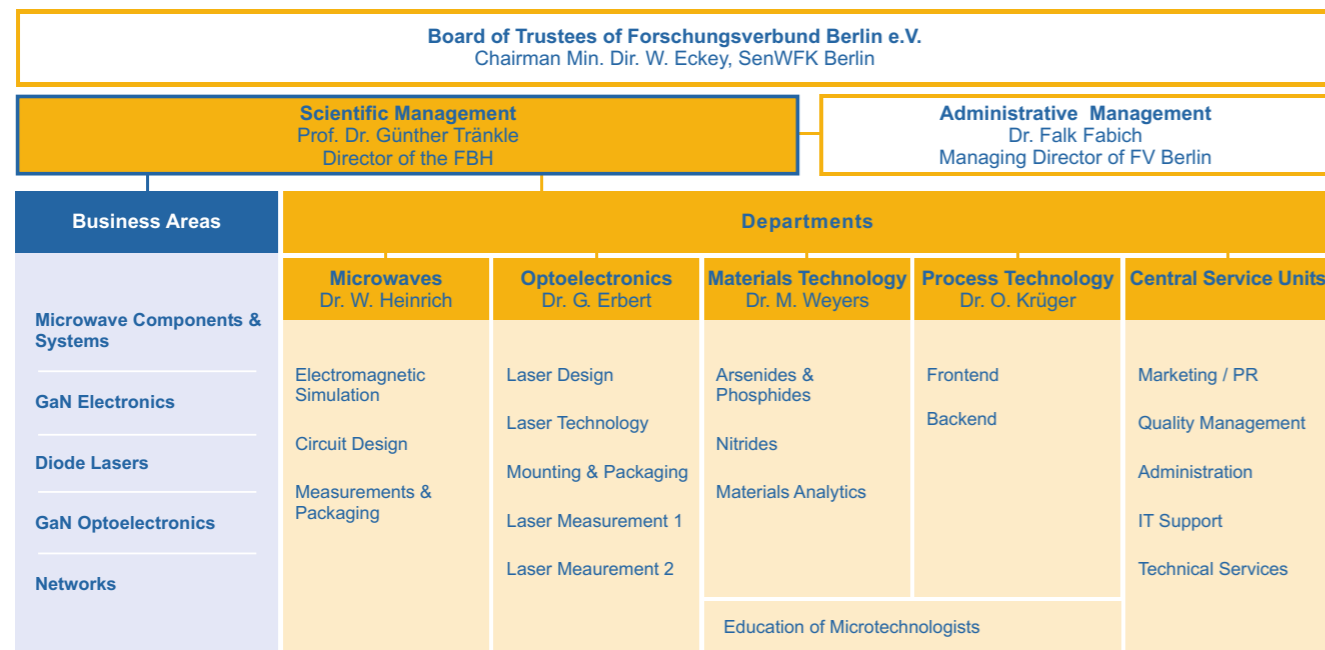


Organigramm // Organizational Chart

Geschäftsbereiche // Business Areas



Abteilungen // Departments



Wissenschaftlicher Beirat // Scientific Board

Vorsitz // Chair

Dr. Hans J. G. Brugger – 31.3.2007
EADS Deutschland GmbH, Ulm

Dr. Gerhard Packeiser 1.4.2007
Infineon Technologies AG, München

Mitglieder // Members

Dipl.-Ing. Bernd Adelseck 1.4.2007
EADS Deutschland GmbH, Ulm

Dr. Frank van den Bogaart 1.4.2007
TNO Defence, Security and Safety, The Hague (NL)

Prof. Dr. Christian Boit
Technische Universität Berlin, Berlin

Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling – 31.3.2007
Universität Ulm, Ulm

Prof. Dr. Claire Gmachl 1.4.2007
Princeton University, Princeton (USA)

Prof. Dr. Marc Ilegems – 31.3.2007
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne (CH)

Dr. Roland Müller – 31.3.2007
OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

Prof. Dr. Herbert Reichl
Fraunhofer IZM, Berlin

Prof. Dr. Hartmut Roskos – 31.3.2007
Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

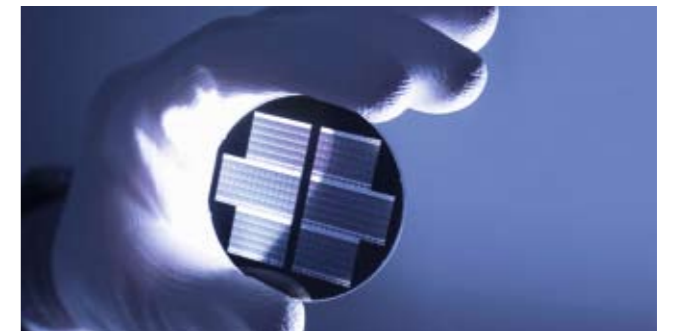
Dr. Uwe Strauss 1.4.2007
OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

Prof. Dr. Robert Weigel 1.4.2007
Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Dr. Theodor Wiesmann 1.4.2007
Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang

Prof. Dr. Bernd Wilhelmi – 31.3.2007
Jenoptik AG, Jena

**SCHLAGLICHTER
HIGHLIGHTS**



■ **Positiv evaluiert: FBH un-
eingeschränkt zur weiteren
Förderung empfohlen**

Laut Evaluierungsbericht ist das Ferdinand-Braun-Institut eines der leistungsfähigsten III/V-Halbleiter-Kompetenzzentren in Europa mit hoher internationaler Sichtbarkeit. Ohne Einschränkung erfüllt das FBH die Anforderungen, die an Einrichtungen von überregionalem und gesamtstaatlichem wissenschafts-politischem Interesse zu stellen sind. Das Institut wurde daher von einer externen wissenschaftlichen Bewertungsgruppe und bestätigt durch den Senat der Leibniz-Gemeinschaft ohne Auflagen zur weiteren Förderung empfohlen.

Anfang März 2007 war das FBH zwei Tage lang von einem 15-köpfigen Gutachtergremium und weiteren Vertretern von Bund, Land und aus dem wissenschaftlichen Beirat auf Herz und Nieren geprüft worden; etwa ein Jahr später lag der abschließende Evaluierungsbericht vor. Diesem zufolge erfüllt das FBH durch seine Möglichkeiten, Halbleiterbauelemente für konkrete Anwendungen zu entwickeln und in Pilotserien herzustellen, eine wichtige Aufgabe in der vorindustriellen Entwicklung und besitzt Vorbildcharakter. Die Qualität der Forschungsarbeiten, bei denen stets besonders auf Anwendungsorientierung und Industrienähe geachtet wird, sei in einigen Bereichen weltführend, teilweise exzellent und ansonsten sehr gut. Dieses werde vor allem durch die sehr hohe Einwerbung von Drittmitteln aus der Industrie sowie die hohe Zahl an erfolgreichen Firmenausgründungen belegt. Auch die vom FBH betriebenen Kooperationen mit Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen wurden positiv bewertet. Insbesondere die Einbindung leitender Universitätsmitarbeiter in Führungspositionen des Instituts sei wegweisend und solle weiter ausgebaut werden. Das FBH dankt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihr Engagement und ihre Unterstützung bei den Vorbereitungen und für den reibungslosen Ablauf.



■ **Looked up Favorably: FBH
Recommended for further Fun-
ding without any Restrictions**

According to the evaluation report, the Ferdinand-Braun-Institut is one of the most capable and internationally highly visible centers of competence for III-V semiconductors in Europe. According to that, FBH meets all requirements made on institutes with a national and an overall scientific and political interest. FBH thus was recommended for further funding without any obligations by an external scientific assessment group, confirmed by the Senate of the Leibniz Association.

In the beginning of March 2007, FBH was put through its paces by 15 consultants and further representatives from the Federal Government, the State of Berlin and FBH's Scientific Board. About one year later, the final evaluation report was presented, saying that FBH fulfils an important function in pre-industrial development and has to be seen as a role model with its capability to develop semiconductor devices for specific applications up to pilot series. The quality of research in a couple of fields is regarded to be world leading, in some parts excellent and apart from that first class. This was proven by the very high amount of third-party funds from industry and the high number of successful spin-off companies. In addition, the co-operations with universities and non-university institutes were estimated very positively. Especially the integration of leading university staff into executive positions of the institute is seen to be groundbreaking and shall be further extended. FBH wants to thank all employees for their involvement and support during the preparations and for the smooth realization.

■ Für die Zukunft gerüstet: noch engere Vernetzung mit den Universitäten

Seit einigen Jahren geht das Ferdinand-Braun-Institut ungewöhnliche Wege was die Vernetzung mit den regionalen Universitäten angeht. Erstmals wurde ab Mitte 2005 mit dem TU-Professor Michael Kneissl eine neuartige Form der Zusammenarbeit erprobt. Michael Kneissl arbeitet seither nicht nur an der Berliner Universität, sondern leitet zugleich am Ferdinand-Braun-Institut den Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik. Während er als Professor die Grundlagen von LEDs und Lasern auf Galliumnitridbasis für den blauen und ultravioletten Spektralbereich untersucht, entwickelt er mit seiner Arbeitsgruppe am FBH mögliche Anwendungen wie beispielsweise UV-Lichtquellen zur Wasserdesinfektion.

Dieses Modell ist so erfolgreich, dass 2007 gleich drei weitere Professuren nach diesem Vorbild vorbereitet wurden. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem TU-Professor Georg Böck wird künftig der Bereich Galliumnitrid-Leistungsmodule am FBH ausgebaut werden; in der Lasermetrologie sind verstärkte Aktivitäten mit dem HU-Professor Achim Peters vorgesehen. Darüber hinaus entwickelt sich eine geplante Stiftungsprofessur im Bereich Terahertz-Photonik mit Unterstützung des Oerlikon-Konzerns sehr positiv. Das FBH sieht diese Formen der Zusammenarbeit als zukunftsweisendes Modell, um durch den engen Austausch schneller Ergebnisse zu erzielen und diese in Anwendungen zu überführen.

■ Well Prepared for the Future: Cooperating Closely with the Universities

Since a couple of years, Ferdinand-Braun-Institut is breaking new ground in networking with the regional universities. Starting in the middle of 2005, a novel form of cooperation was tested for the first time with TU Professor Michael Kneissl. Since then, Michael Kneissl is not only working at the Berlin university, but is also leading the Business Area GaN Optoelectronics at Ferdinand-Braun-Institut. As a professor he explores the basic principles of gallium nitride based LEDs and lasers for the blue and ultraviolet spectral range, with his FBH work group he develops possible applications such as e.g. UV light sources for water disinfection. This form of cooperation stood the test. It even became a role model for three further professorships being prepared in 2007. By closely cooperating with TU Professor Georg Böck, the field of gallium nitride power modules at the FBH will be strengthened; activities in the laser metrology field, are projected to be reinforced with HU Professor Achim Peters. In addition, the projected foundation professorship in terahertz photonics, supported by the Oerlikon Group, develops very positively. FBH considers these forms of close collaboration as a trend-setting model in order to accelerate results and convey them into applications.



Michael Kneissl

■ Ausgewiesene Exzellenz: Sfb 787

Gemeinsam mit sechs weiteren Partnern war das FBH mit seinem Antrag für einen Sonderforschungsbereich (Sfb) und ein integriertes Graduiertenkolleg erfolgreich. Ab Anfang 2008 nimmt der Sfb unter Federführung der TU Berlin seine Arbeit im Sonderforschungsbereich 787 "Halbleiter-Nanophotonik: Materialien, Modelle, Bauelemente" auf; Sprecher ist der FBH-Geschäftsbereichsleiter und TU-Professor Michael Kneissl. Etwa 11 Millionen Euro Drittmittel werden über die erste Laufzeit von vier Jahren von der Deutschen Forschungsgemeinschaft in das Netzwerk fließen. Geplant ist eine Gesamtlaufzeit von zwölf Jahren mit einem Gesamtfördervolumen von circa 35 Millionen Euro. Insgesamt forschen mehr als 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Berlin und Magdeburg an neuartigen photonischen Bauelementen, Nanomaterialien und deren mathematischen Modellen.

Das FBH ist in zwei Teilprojekten maßgeblich beteiligt. Im Teilprojekt A1, "Materialien für grüne Laserdioden hoher Brillanz", geht es um die Realisierung hocheffizienter InGaN-Nanomaterialien und darauf basierend die Demonstration GaN-basierter Laserdioden hoher Brillanz im blau-grünen Spektralbereich. Dieses Projekt ist ein Baustein für den Schwerpunkt GaN-Optoelektronik am FBH, der in enger Kooperation mit der TU Berlin weiterentwickelt wird.

Physikalisch-technologische Grundlagen für die Realisierung der nächsten Generationen von Hochleistungsdiodenlasern werden im Teilprojekt C5, "Halbleiterlaser hoher Brillanz" erforscht. Schwerpunkt sind Schichtstrukturen für Halbleiterlaser, die sich durch eine extrem geringe Divergenz ($< 7^\circ$) und neuartige Formen der Wellenlängenstabilisierung auszeichnen. Das Projekt ordnet sich am FBH in den Geschäftsbereich Diodenlaser ein und ergänzt die Forschungsarbeiten zu hochbrillanten und hocheffizienten Diodenlasern.

■ Extrem zuverlässig: FBH-Laser fliegen im All

Dem FBH ist es gelungen äußerst zuverlässige und kompakte Halbleiterlaser-Module zu entwickeln, die die hohen internationalen Qualitätsanforderungen für Weltraumanwendungen erfüllen. Sie sind nur etwa so groß wie ein Stück Würfelzucker und zeichnen sich durch ihre hohe Leistung, hohe Effizienz und eine exakt definierte Wellenlänge aus.

■ Proven Excellence: Sfb 787

FBH, together with six partners, was successful with its application for a collaborative research center (Sonderforschungsbereich – Sfb) and an integrated post graduate program. In the beginning of 2008, the Sfb 787 under the direction of TU Berlin started its work on "Semiconductor NanoPhotonics: Materials, Models, Devices", whose speaker is FBH's Head of Business Area and TU Professor Michael Kneissl. About 11 Million Euro third party funds will be invested over the first four-year period by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft). An overall period of twelve years with a total funding of approximately 35 Million Euro is projected. All in all, more than 100 scientists from Berlin and Magdeburg research on novel photonic devices, nano materials and related mathematic models.

FBH considerably contributes to the Sfb 787 within two projects. In sub-project A1 "Materials for High Brilliance Green Laser Diodes", activities aim at the realization of highly efficient InGaN nano materials and the demonstration of high-power GaN-based laser diodes in the blue and green spectral range. The project is an important building block for FBH's activities in the GaN Optoelectronics field, which is co-developed together with the TU Berlin.

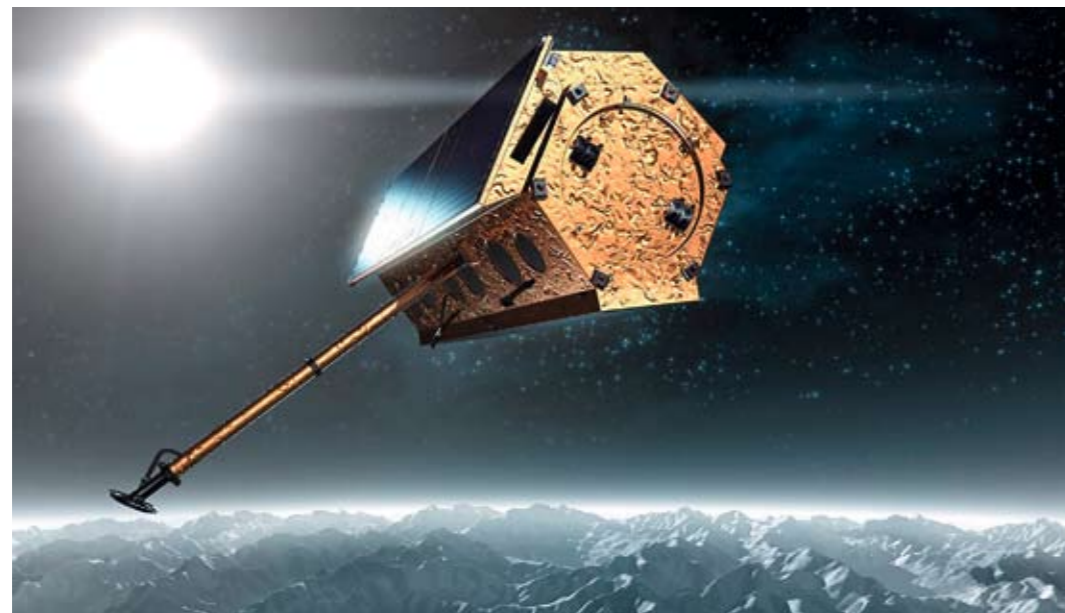
In sub-project C5 "High Brilliance Semiconductor Lasers" the physics and the technological basis for the next generation of high-power laser diodes will be investigated. The goal is to develop semiconductor lasers structures that enable extremely small beam divergence ($< 7^\circ$) and new approaches for wavelength stabilization. The project is integrated into the research activities of FBH's Business Area Diode Lasers, completing its research on high brilliance and high efficiency laser diodes.

■ Exceptionally Reliable: FBH's Lasers in Space

FBH managed to develop extremely reliable and compact semiconductor laser modules, which comply with the high international quality requirements for space applications. They are just as big as a piece of lump sugar and are distinguished by their high output power, high efficiency and exactly defined wavelength. With the successful start of US satellite NFIRE in April

Mit dem erfolgreichen Start des US-Satelliten NFIRE im April 2007 und zwei Monate später des europäischen Radarsatelliten TerraSAR-X stellen die ersten Laser aus dem FBH im Weltraum ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis. Die FBH-Module dienen als Pumpquelle für hocheffiziente Festkörperlaser, die in neuartigen Laserkommunikationsterminals (LCT) an Bord beider Satelliten integriert sind. Mit diesen LCTs sollen mittels optischer Datenübertragung hohe Datenmengen zur Erde und zwischen Satelliten übertragen werden. Die Nutzung von Lichtwellen erlaubt es, Daten künftig zwanzigmal schneller als mit den bislang üblichen Funkwellen aus dem Weltraum zu übermitteln – das entspricht einer Datenmenge von ungefähr 400 DVDs pro Stunde. Erste Tests sind bereits überaus erfolgreich verlaufen.

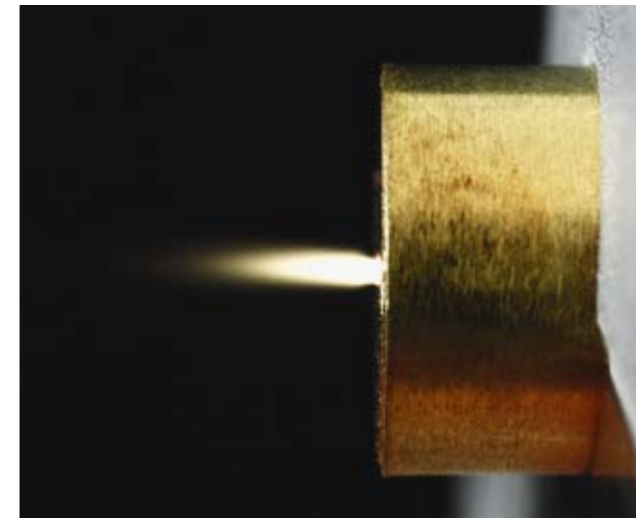
2007 and European radar satellite TerraSAR-X two months later, the first lasers from FBH demonstrated their high level of ability. The FBH modules serve as pump sources for highly efficient solid state lasers, which are integrated in novel laser communication terminals (LCT) on board of both satellites. High data rates shall be transmitted with these LCTs via optical data transfer to earth and between the satellites. The usage of light waves prospectively allows to transfer data from space about twenty times quicker than with the so far standard radio waves; this is a data volume of about 400 DVDs per hour. First tests were accomplished very successfully.



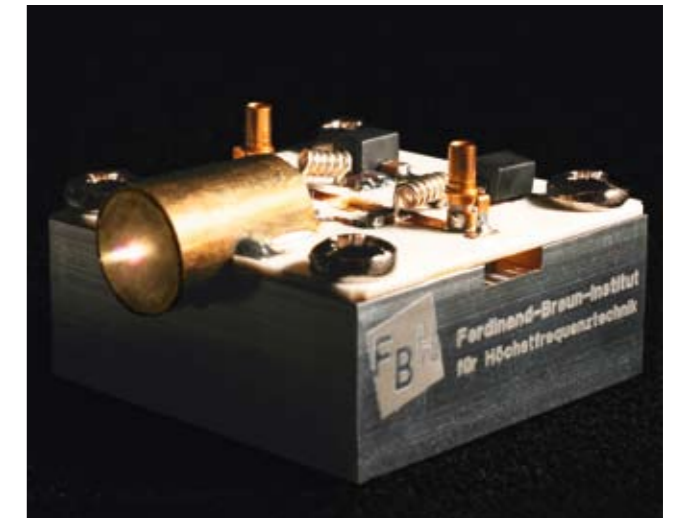
Deutscher Radarsatellit TerraSAR-X
German radar satellite TerraSAR-X

Neuere medizinische Erkenntnisse haben ergeben, dass der Heilungsprozess durch spezielle Gase wie Stickstoffmonoxid (NO) verbessert wird. Diese zerfallen jedoch an der Luft. Mit der Atmosphären-Plasmaquelle aus dem Ferdinand-Braun-Institut ist es dagegen möglich, NO aus den Basisgasen Stickstoff und Sauerstoff direkt in einer kleinen Plasmaflamme herzustellen – es wirkt also, bevor es zerfallen kann. Dadurch können Gase bei normalem Luftdruck so angeregt werden, dass eine kalte Flamme entsteht, die die Haut nicht verbrennt. Zudem ist es gelungen, eine kleine und kompakte Plasmaquelle zu entwickeln, die ohne hohe Spannungen auskommt und dadurch sicher gehandhabt werden kann. Im Gegensatz zu anderen atmosphärischen Quellen wird das FBH-Gerät mit 24 Volt Niederspannung betrieben; es werden weder Leistungen im 1000-Watt-Bereich noch hohe Spannungen benötigt.

Latest medical findings turned out, that the healing process can be improved with specific gases such as nitrogen monoxide (NO). However, these gases decompose at ambient air. With the atmospheric plasma source from the Ferdinand-Braun-Institut it is now possible to create NO directly in a little plasma flame from the basic gases nitrogen and oxygen so that it is taking effect before the gas decomposes. Thus, gases can be stimulated the way that a comparatively cold flame comes up and which does not burn the skin. In addition, FBH managed to develop a small and compact plasma source that does not require high voltage and thus can be handled safely. In contrast to other atmospheric sources, this model operates at a low voltage of 24 Volt – neither electrical power in the 1000 Watt range nor high voltage is necessary.



Atmosphärisches Mikrowellenplasma
Atmospheric Microwave Plasma



■ Heilsam: Mikrowellen-Plasmen für medizinische Anwendungen

Im Bereich der Mikrowellen-Plasmen, erforscht das FBH Plasmaquellen, die bei Atmosphärendruck, also an der normalen Umgebungsluft, funktionieren. Nun ist es gelungen, eine neuartige Plasmaquelle zu entwickeln mit der Hauterkrankungen wie Schuppenflechte oder Neurodermitis behandelt und die Wundheilung verbessert werden soll.

■ Salutary: Microwave Plasmas for Medical Applications

FBH develops microwave plasma sources which operate under atmospheric pressure, meaning at the normal ambient air. The institute now successfully developed a new plasma source which is designed to treat skin diseases such as psoriasis and neurodermatitis and to improve wound healing.

**Deutlicher Zuwachs:
Drittmittel um 45% gestiegen**

Das FBH konnte 2007 die Zahl seiner Drittmittelwerbungen erneut erfreulich deutlich steigern. Nach 5,6 Millionen Euro aus öffentlichen Drittmitteln und industrieller Auftragsforschung im Jahre 2006 belief sich der Drittmittelanteil im Jahr 2007 auf 8,1 Millionen Euro. Das ist eine Steigerung um 45% – die Summe liegt damit nur knapp unter der Grundfinanzierung des Bundes und des Landes Berlin in Höhe von 9,0 Millionen Euro.

**Umstrukturiert: Neue
Organisationsform für ein
wachsendes Institut**

Seit seiner Gründung hat sich die Mitarbeiterzahl des Instituts fast verdoppelt. Hinzu kommt der große Erfolg des FBH in der angewandten Forschung, der zu einer starken Ausweitung der Geschäftstätigkeit geführt hat. Auf diese Entwicklungen hat das FBH im Sommer 2007 mit dem Umbau seiner Organisationsstruktur reagiert: zu den bereits bestehenden vier Abteilungen kamen vier Geschäftsbereiche hinzu: Mikrowellenbauelemente und -systeme, GaN-Elektronik, Diodenlaser und GaN-Optoelektronik. Die Geschäftsbereiche decken dabei den gesamten Bereich von der Grundlagenforschung bis zur konkreten Applikation ab. Die technischen und wissenschaftlichen Ressourcen des Instituts werden weiterhin von den Abteilungen bereitgehalten.

Ergänzt werden diese acht fachspezifischen Einheiten durch den Geschäftsbereich Netzwerke, der sich um die Themen Aus- und Weiterbildung sowie Transfer kümmert, und durch eine Serviceeinheit Zentrale Bereiche. Damit verfügt das FBH über eine neue Matrixstruktur, mit der das Institut sein Leistungsspektrum und seine Angebote transparent nach außen präsentiert und das weitere Wachstum organisatorisch sichert.

Am meisten betroffen von den Umstrukturierungen war die Abteilung Prozesstechnologie, deren bisheriger Leiter Joachim Würfl den neu gegründeten Geschäftsbereich GaN-Elektronik übernahm. Neuer Abteilungsleiter wurde Olaf Krüger, ein langjähriger Mitarbeiter in der Prozesstechnologie und dort verantwortlich für die Lasermikrostrukturierung. Der neu geschaffene Bereich GaN-Optoelektronik wird von

**Considerable Increase: Third-
Party Funds have Risen 45%**

Once again, FBH was able to significantly enlarge the number of third-party funds (public funding and industrial third-party funds) in 2007. The amount increased from 5.6 Million Euro in 2006 to 8.1 Million Euro in 2007, an enhancement of 45%. This sum is barely below the basic funding of 9.0 Million Euro by the Federal Government and the State of Berlin.

**Reshuffled: New Form of
Organization for a Growing
Institute**

Since founding, the number of employees at FBH has nearly doubled. Added to that, the institute's great success in application-oriented research has significantly expanded business activities. As a consequence of this strong growth process, FBH reformed its organizational structure. In addition to the four existing departments, four business areas were established: Microwave Components and Systems, GaN Electronics, Diode Lasers, and GaN Optoelectronics. These business areas cover the whole range from basic research to the concrete application, whereas technical and scientific resources of the institute are provided by the departments.

These eight technological units are completed by the Business Area Networks, which coordinates various networking projects and is involved in vocational and academic education and training. Further central service units support the smooth work flow. FBH thus provides a new matrix structure which clearly represents its service portfolio and products. In addition, this structure organizationally gears the institute up for the conceivable growth.

Mostly affected from the restructuring process was FBH's Process Technology Department as its previous department chief Joachim Würfl took over the newly created Business Area GaN Electronics. New Head of Department was appointed Olaf Krüger, at FBH responsible for laser micro structuring and a long-term member of staff. The new Business Area GaN Optoelectronics is headed by Michael Kneissl, who is also a professor at the TU Berlin for gallium nitride light sources. The Head of Departments Götz Erbert

Michael Kneissl geleitet, der zugleich als Professor an der TU Berlin an Gallimnitrid-Lichtquellen forscht. Die beiden Abteilungsleiter Götz Erbert (Optoelektronik) und Wolfgang Heinrich (Mikrowellentechnik) übernahmen zusätzlich die Geschäftsbereiche Diodenlaser bzw. Mikrowellenbauelemente und -systeme.

(Optoelectronics) and Wolfgang Heinrich (Microwaves) are now additionally responsible for the Business Areas Diode Lasers and Microwave Components and Systems.



Die Abteilung Prozesstechnologie vor der Umstrukturierung
Process Technology Department before restructuring

**Abschied und Neubeginn:
Wechsel im Beirat**

Das Jahr 2007 war ein Jahr der Veränderungen im wissenschaftlichen Beirat des FBH. Im März endete die zweite Amtsperiode des langjährigen Beiratsmitglieds und Vorsitzenden Dr. Hans J. G. Brugger, Leiter der Microwave Factory der EADS Deutschland GmbH. Das Ferdinand-Braun-Institut dankt Dr. Brugger für die vierjährige engagierte und sehr konstruktive

**Farewell and New Start:
Changes in the Board**

The year 2007 was also a year of changes in FBH's Scientific Board. In March, the second term of long-time member and Chair of the Board Dr. Hans J. G. Brugger, Head of Microwave Factory, EADS Deutschland GmbH, expired. Ferdinand-Braun-Institut thanks Dr. Brugger for his dedicated and very constructive four-year collaboration. He sustainably enriched and

Zusammenarbeit, mit der er die wissenschaftliche Arbeit des FBH bereichert und begleitet hat. Er wird von Dr. Gerhard Packeiser, Infineon Technologies AG, abgelöst, der dem wissenschaftlichen Beirat seit 2001 angehört.

Ebenfalls im März 2007 wurden Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling, Prof. Dr. Marc Ilegems, Dr. Roland Müller, Prof. Dr. Hartmut Roskos und Prof. Dr. Bernd Wilhelmi verabschiedet. Neu bestellt wurden Bernd Adelseck, Dr. Frank van den Bogaart, Prof. Dr. Claire Gmachl, Dr. Uwe Strauss und Prof. Dr. Robert Weigel.



Hans J. G. Brugger

**Der Beirat wird weiblich:
Claire Gmachl neu berufen**

Das FBH freut sich, mit Prof. Gmachl erstmals eine Frau für den wissenschaftlichen Beirat gewonnen zu haben. Claire Gmachl ist Professor für Elektrotechnik an der Princeton University, USA und beschäftigt

accompanied the scientific work of FBH. Dr. Gerhard Packeiser, Infineon Technologies AG, who is a member of the Board since 2001 follows Dr. Brugger in this position.

Also in March 2007, Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling, Prof. Dr. Marc Ilegems, Dr. Roland Müller, Prof. Dr. Hartmut Roskos, and Prof. Dr. Bernd Wilhelmi left the Board. Bernd Adelseck, Dr. Frank van den Bogaart, Prof. Dr. Claire Gmachl, Dr. Uwe Strauss, and Prof. Dr. Robert Weigel were newly appointed.



Gerhard Packeiser

**Scientific Board Becomes
Female: Claire Gmachl newly
Appointed**

FBH is very pleased to welcome Prof. Claire Gmachl in its advisory body. She is the first women being appointed into FBH's Scientific Board. Claire Gmachl is a Professor for Electrical Engineering at Princeton

sich zurzeit vor allem mit der Entwicklung neuartiger Quantenkaskaden-Laser. Die gebürtige Österreicherin hat in Innsbruck studiert und kam über Stationen in Wien und München zu den Bell Laboratories in die USA. Dort trat sie eine Postdoc-Stelle an und wechselte schließlich 2003 nach Princeton. Claire Gmachl leitet dort unter anderem das von der National Science Foundation geförderte Engineering Research Center zu Mid-Infrared Technologies for Health and the Environment (MIRTHE). Sie wurde mehrfach ausgezeichnet und unter anderem 2004 vom amerikanischen Journal "Popular Science" unter die zehn brilliantesten Wissenschaftler des Jahres gewählt; 2005 gewann sie den so genannten "Genius Grant" der MacArthur Foundation.

University, USA and currently working on the development of novel quantum cascade lasers. The native born Austrian has earned her M.Sc. in Innsbruck, later working in Vienna and Munich, before she became a post-doctoral member of technical staff at Bell Laboratories, USA. After leaving bell labs, she took her position at Princeton University. Claire Gmachl is, among others, leading the Engineering Research Center on Mid-Infrared Technologies for Health and the Environment (MIRTHE). For her excellent achievements she was honoured several times. In 2004 for example, she was elected one of the ten most brilliant scientists of the year by the American journal "Popular Science". In 2005 Ms. Gmachl won the so called "Genius Grant" of the MacArthur Foundation.



Claire Gmachl

■ **Maßgeschneiderte Mitarbeiterförderung: Weiterbildungen, Managementtrainings, Aufbaustudiengänge ...**

Um engagierte Mitarbeiter nachhaltig zu motivieren und vielversprechenden Talenten langfristige Perspektiven zu eröffnen, bietet das Ferdinand-Braun-Institut seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern passgenaue Weiterbildungs- und Qualifizierungsmöglichkeiten. Das FBH unterstützt sie bei der Aus- und Weiterbildung sowohl finanziell als auch durch flexible Arbeitszeitgestaltung.

Professionalisierung im Wissenschaftsmanagement

Zwei junge Wissenschaftler, Katrin Paschke und Chafik Meliani, absolvieren ein 18-tägiges berufsbegleitendes Fortbildungsprogramm. Mit Modulen wie Kommunikation und Konfliktmanagement, Mitarbeiterführung oder Projektmanagement und Verhandlungen soll die wissenschaftliche Kompetenz der Nachwuchsführungskräfte durch operative und strategische Fähigkeiten ergänzt werden. Das hilft den jungen Wissenschaftlern, sich selbst und ihren Forschungsalltag besser zu organisieren. Neben der fachlichen Qualifikation wird zugleich die Vernetzung mit etablierten Führungskräften, u.a. durch ein Mentorenprogramm gefördert.



Katrin Paschke

■ **Tailored Personnel Development: Advanced Training, Management Trainings, Post-graduate Studies ...**

Ferdinand-Braun-Institut offers its employees custom-fit advanced trainings and further qualification opportunities in order to sustainably motivate dedicated staff and to open up career prospects for promising talents. FBH also supports them in vocational and academic education and training with both subsidy and flexible working hours.

Professionalization in Science Management

Two young scientists, Katrin Paschke and Chafik Meliani, complete an 18-day extra-occupational training program. With modules such as communications and conflict management, personnel management and project management their scientific competence shall be completed with operational and strategic skills. These abilities help young scientists to organize their daily routines in research as well as to facilitate self-organization. In addition to professional expertise, networking with established executives, e.g. by means of a mentoring program, is supported.



Chafik Meliani

Aufbaustudium Wissenschaftsmarketing

Auf die zunehmende Professionalisierung im Bereich Wissenschaftskommunikation und Forschungsmarketing hat die TU Berlin mit ihrem berufsbegleitenden Masterstudiengang "Wissenschaftsmarketing" reagiert. Den ersten Durchlauf des 2-jährigen Aufbaustudiengangs hat der Leiter des FBH-Geschäftsbereichs Netzwerke, Nicolas Hübener, Ende 2007 erfolgreich abgeschlossen. Eine weitere Kollegin, Doreen Friedrich, hat noch ein Ausbildungsjahr vor sich. Überzeugt haben Nicolas Hübener vor allem die fast ausschließlich aus der Praxis stammenden Referentinnen und Referenten des Studiengangs, die mit ihrem großen Erfahrungsschatz auch wichtige Hintergrundinformationen gaben. Seine mit "sehr gut" bewertete Masterarbeit beschäftigte sich mit Wide-Bandgap-Semiconductors, einem der Zukunftsthemen des FBH.

Post-Graduate Studies Science Marketing

As a result of increasing demands in the fields of science communications and research marketing, TU Berlin initiated an extra-occupational master degree program. The Head of Business Area Networks, Nicolas Hübener, successfully completed the first cycle of the two-year studies program. His colleague, Doreen Friedrich, will finish this program in one year. Nicolas Hübener was especially convinced by the instructors which mostly came from the praxis, contributing with their great experience and giving useful background information. His master's thesis, evaluated "excellent", dealt with Wide Bandgap Semiconductors, one of FBH's future topics.



Nicolas Hübener

Gewerbliche Weiterbildung und Karriereperspektiven

Auch im gewerblichen Bereich fördert das FBH seine Mitarbeiter durch Weiterbildungen. Derzeit befinden sich zwei Laboranten, Alexander Külberg und Martin Lipsz, in der Fortbildung zum Staatlich geprüften Techniker Mikrosystemtechnik. Als Facharbeiter qualifizieren sie sich damit für verantwortungsvollere Aufgaben in ihrem Arbeitsgebiet. Aufstiegsmöglichkeiten bietet auch die klassische Berufsausbildung am FBH. So hat der Mikrotechnologe Daniel Schauer kurz nach seinem ausgezeichneten Ausbildungsabschluss eine leitende Tätigkeit übernommen. Als Laborverantwortlicher für den Bereich Epitaxie ist er für alle technischen Aspekte in diesem Reinraumbereich zuständig und Schnittstelle zu den Kollegen der Technischen Dienste.



Daniel Schauer beim Programmieren der MOVPE-Anlage
Daniel Schauer programming the MOVPE system

Industrial Training and Career Prospects

Also in the field of vocational training, FBH encourages its employees with further trainings. Currently, two laboratory assistants, Alexander Külberg and Martin Lipsz, complete a technician training course with focus on microsystems technologies. As skilled workers they qualify for more responsible tasks in daily working routine. Career opportunities are also possible with classical vocational training. Daniel Schauer, just after excellently completing his microtechnologist training, started working in a leading position. As an interface between scientists and technicians, he is now responsible for the epitaxy laboratory and taking care of all technical aspects in this clean-room area.

Nacht bei den drei Berliner Universitäten HU, TU und FU. Die zentralen Anliegen von Günther Tränkle sind, die wichtige Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft deutlich zu machen und neue Besucherkreise zu erschließen. So wurde zur Wissenschaftsnacht 2007 erstmals im Bahnhof Friedrichstraße ein Infocenter eingerichtet, um die breite Bevölkerung besser zu informieren und mit anschaulichen Experimenten Lust auf mehr zu machen. Auch das FBH war mit seinem Handymessplatz einen Tag vor Ort. Ein mobiles Infocenter soll 2008 an verschiedenen, stark frequentierten Orten aufgebaut werden und das Infocenter in der Friedrichstraße ergänzen.

Berlin universities HU, TU and FU. Core concerns of Günther Tränkle as the new chairman are to emphasize the important relationship between research and industry and to lure new sections of visitors. For this purpose, just before the Science Night 2007, a new temporary info center was opened for the general public. This center located in the Friedrichstraße Station is intended to improve information about the event and to whet the appetite for more with lively experiments. FBH was also on the spot for one day with its cellular phone measuring station. In 2008, a mobile information booth, being built up on various highly frequented places, will supplement the info center.



So funktioniert ein Laser
How a laser works



Infocenter der Wissenschaftsnacht
Info center of the Science Night

Gewählt: Günther Tränkle ist Vorsitzender der Lange Nacht der Wissenschaften und von OpTecBB

Lange Nacht der Wissenschaften

Ende 2006 wurde Günther Tränkle als Vertreter der IGAF (Initiativgemeinschaft Außeruniversitärer Forschungseinrichtungen in Adlershof) für zwei Jahre zum neuen Kuratoriumsvorsitzenden der Langen Nacht der Wissenschaften 2007 und 2008 gewählt. Damit gibt es erstmals einen Vertreter der außeruniversitären Forschung in dieser Funktion. In den vorangegangenen sechs Jahren lagen der Kuratoriumsvorsitz und damit die Geschäftsführung der Langen

Chosen: Günther Tränkle Elected Chairman of Night of Sciences and OpTecBB

Night of Sciences

At the end of 2006, Günther Tränkle as a representative of IGAF (Joint Initiative of Non-University Research Institutions in Adlershof) was elected chairman of the Night of Sciences for the years 2007 and 2008. Hence, for the first time a representative of non-university research institutes was nominated for this function. During the previous six years, the chair of the board of trustees and thus the management of the Night of Sciences was in the hands of the three

OpTecBB

Auf die Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft setzt Günther Tränkle auch als Vorsitzender des Kompetenznetzes Optec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e. V. In diese Funktion wurde er am 1. Juni 2007 gewählt.

Seit 2007 werden die Optischen Technologien und die Mikrosystemtechnik in Berlin als ein Kompetenzfeld betrachtet. Ein Masterplan soll 2008 vorgelegt werden. Eigenständig gemanagte Netzwerke wie OpTecBB, TSB Adlershof und das Zentrum für Mikrosystemtechnik in

OpTecBB

Günther Tränkle also focuses on the relation between science and industry with his activities for the competence network Optec-Berlin-Brandenburg (OpTecBB) e. V., of which he was elected chair on 1st of June, 2007.

Since 2007, Optical Technologies and Microsystems Technology in Berlin are regarded as one field of competence. A corresponding master plan shall be presented in 2008. As a consequence, independently managed networks such as OpTecBB, TSB Adlershof,

Berlin (ZEMI) rücken damit noch enger zusammen. Kein Problem, da alle Netzwerke in Adlershof sitzen und ZEMI außerdem mit seiner Geschäftsstelle am Ferdinand-Braun-Institut angesiedelt ist.

and the Center for Microsystems Technology in Berlin (ZEMI) close ranks. No problem, as all of these networks are based in Adlershof and the ZEMI office, in addition, is located at the Ferdinand-Braun-Institut.

**Attraktiv und innovativ:
600 qm Solarwand eingeweiht**

Die umfangreichen Bauarbeiten am FBH haben mit der Verkleidung der Westseite der Laborhalle mit innovativen Dünnschicht-Solarmodulen aus Kupfer-Indium-Sulfid ihren Abschluss gefunden. Die mehr als 600 qm große Pilotanlage der Firma Sulfurcell wurde im Januar 2007 gemeinsam mit dem Unternehmen, der Betreiberfirma Dachland und Mitarbeitern des FBH offiziell eingeweiht. Optisch ist die Solarwand jedenfalls ein echter Hingucker – Volkswagen nutzte die elegant gebogene, schwarze Fassade drei Monate später bereits als Kulisse für einen seiner Auto-Werbespots.

**Attractive and Innovative:
Inauguration of 600 sqm
Solar Wall**

After the cladding of the laboratory hall with innovative thin-film solar modules, comprehensive construction works at the FBH have finally come to an end. Sulfurcell's 600 sqm big copper-indium-sulphide pilot installation was officially inaugurated in January 2007 together with Sulfurcell, the operating company Dachland, and FBH's employees. The wall soon turned out to be a real eye-catcher – Volkswagen used the elegantly curved black façade only three months later as a setting for one of the company's commercials.



FBH Solarwand als Filmkulisse
FBH's solar wall became a film set

Gut organisiert: Messen und Konferenzen

Well Organized: Fairs and Conferences

Internationale Fachkonferenz ausgerichtet: DRIP in Berlin

Wissenschaftler und Industrievertreter haben sich im September 2007 in Berlin zur 12th International Conference on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP12) getroffen. Bei der 5-tägigen Tagung mit etwa 160 Teilnehmern ging es um die Erkennung, die Sichtbarmachung mittels abbildender Methoden und die Physik von Defekten in Halbleitern und Halbleiterbauelementen.

Ausgerichtet wurde die zwölfte DRIP-Konferenz vom Ferdinand-Braun-Institut und dem Max-Born-Institut (MBI) gemeinsam. Ute Zeimer (FBH) und Jens Tomm (MBI) organisierten nicht nur die Fachkonferenz, sondern auch die gut besuchte Posterausstellung, Laborführungen durch verschiedene Institute auf dem Adlershofer Campus (FBH, MBI und IKZ) und das Konferenzdinner im Berliner Fernsehturm.

International Conference Organized: DRIP in Berlin

In September 2007, scientists and representatives from industry have met in Berlin for the 12th International Conference on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP12). The five-days meeting attracted about 160 experts worldwide.

The 12th DRIP conference was organized by Ferdinand-Braun-Institut and Max-Born-Institut (MBI) jointly. Ute Zeimer (FBH) and Jens Tomm (MBI) were not only responsible for the conference but also for the well-frequented poster exhibition, laboratory tours through various research institutes at the Adlershof Campus (FBH, MBI and IKZ) and the conference dinner held in the Berlin Television Tower.



DRIP-Konferenz im Courtyard Hotel
DRIP conference at Courtyard Hotel



Die Organisatoren Ute Zeimer und Jens Tomm beim Rahmenprogramm
The organizers Ute Zeimer and Jens Tomm at the social program

Besuchermagnet: EuMW in München

Visitor Magnet: EuMW in Munich

Die bedeutendste europäische Veranstaltung im Bereich Mikrowellen und Wireless Technologies, European Microwave Week 2007 (EuMW), wurde 2007 von einem Team unter der Federführung des Ferdinand-Braun-Instituts organisiert. Wolfgang Heinrich, Abteilungsleiter für Mikrowellentechnik, war als General Chair für die Gesamtkonferenz zuständig; Programm-Chair war Matthias Rudolph, ebenfalls Wissenschaftler am FBH.

A team lead-managed by the Ferdinand-Braun-Institut organized the most significant European event in microwaves and wireless technologies. Wolfgang Heinrich, Head of Microwave Technology Department was appointed General Chair for the European Microwave Week 2007 (EuMW); Matthias Rudolph, being a scientist of the FBH as well, was assigned Program Chair.

Die jährlich stattfindende Konferenz und Fachmesse fand Anfang Oktober 2007 in München statt. Sie zog mehr als 4.100 Besucher an und erreichte damit einen neuen Besucherrekord. In diesen Zahlen spiegeln sich das zunehmende Interesse an innovativen Technologien in der drahtlosen Kommunikation und Sensorik wieder, sagte der damalige bayerische Wirtschaftsminister Erwin Huber beim EuMW-Empfang.

The annual conference and trade fair took place in Munich in the beginning of October 2007. The event attracted more than 4,100 visitors and thus achieved a new record attendance. These figures reflect the increasing interest in innovative technologies in wireless communications and sensors, said Bavarian Minister of Economic Affairs at that time, Erwin Huber on the EuMW evening event.



Wirtschaftsminister Huber und Wolfgang Heinrich beim EuMW-Empfang
Bavarian Economy Minister Huber and Wolfgang Heinrich at the EuMW

Internationale Gäste: Besucher aus Wirtschaft und Wissenschaft

Seit vielen Jahren arbeitet das FBH weltweit mit Partnern aus Forschung und Industrie zusammen, insbesondere aus dem europäischen, asiatischen und US-amerikanischen Ausland. Neben bilateralen Gesprächen nutzt das FBH solche Besuche häufig auch, um ausgewählte Themen im Rahmen seiner Instituts-Kolloquien darzustellen. So stellten 2007 unter anderem Wissenschaftler der Technischen Universität Dänemark, Entwickler des schwedischen Unternehmens Acree oder Mitarbeiter von Sony, Japan aktuelle Ergebnisse und Entwicklungen den Kolleginnen und Kollegen am FBH vor. Daraus ergeben sich vielfach neue Ansätze für Kooperationen und Projekte.

International Guests: Visitors from Industry and Science

Since many years, FBH cooperates with partners from research and industry especially from Europe, Asia and the United States. In addition to bilateral conversation and whenever appropriate, FBH invites such visitors to give a lecture on selected topics. 2007 for example, scientists from the Technical University Denmark, developers from the Swedish company Acree as well as senior staff from Sony Japan presented FBH's scientists their latest results and developments. Hence, such talks offer the possibility for further discussions and are thus opening a chance for the set-up of new projects and cooperations.



Teilgenommen: weitere Messen und Veranstaltungen

Participated: Further Fairs and Events

Ausgestellt: Laser 2007

On Display: Laser 2007

Auf der Fachmesse Laser 2007 in München präsentierte sich das Ferdinand-Braun-Institut im Juni auf einem Gemeinschaftsstand des Landes Berlin. Es stellte dort eine miniaturisierte Laserquelle mit höchster Strahlqualität vor, den "Distributed-Bragg-Reflector Master Oszillator Power Amplifier" (DBR-MOPA). Dieser Laser ist eine Schlüsselkomponente für eine Reihe von bislang schwer zugänglichen Anwendungsfeldern. Damit können beispielsweise kompakte Strahlquellen im blauen und grünen Spektralbereich realisiert werden, die Bilder in Kinoqualität für Zuhause liefern sollen. Weitere Anwendungsbereiche sind optische Spektroskopieverfahren und die Medizintechnik.

At the Laser fair in Munich in June 2007, FBH was on the spot to present its brilliant light sources on a joint booth of the State of Berlin. Ferdinand-Braun-Institut introduced its miniaturized laser source with highest beam quality, the "Distributed-Bragg-Reflector Master Oscillator Power Amplifier" (DBR MOPA). This laser is a key component for a number of application fields which so far have been difficult to access. Compact light sources in the blue and green spectral range for example can be realized delivering images in motion-picture quality for home use. Further applications are in optical spectroscopy and medical technology.

Veranstaltungsreihe in der URANIA: 15 Jahre Forschungsverbund

Mit einer Veranstaltungsreihe in der Berliner URANIA hat der Forschungsverbund Berlin (FVB) sein 15-jähriges Bestehen gefeiert. Den Auftakt machten am 20. Februar ein Empfang und eine Podiumsdiskussion mit dem Berliner Wissenschaftssenator Jürgen Zöllner. Im März stellten sich dann die acht FVB-Institute in Einzelvorträgen an der URANIA einem größeren Publikum vor. So auch Bernd Sumpf vom FBH mit dem Thema "Kleine Laser – Große Wirkung: Halbleit Laser für Medizin und Gesundheit".

URANIA Lectures: 15 Years Celebration of the Forschungsverbund

With a series of lectures the Forschungsverbund Berlin (FVB) celebrated its 15 years of existence in Berlin URANIA, starting on 20th of February with an official reception and a panel discussion with Jürgen Zöllner, Berlin Senator of Education, Science and Research. In March each of the eight FVB institutes presented certain topics to the public, like Bernd Sumpf from the FBH with his topic "small lasers – great effect: semiconductor lasers for medicine and health".

Zwischenstopp am FBH: ERC-Pressetour

Anlässlich der Auftaktkonferenz des Europäischen Forschungsrates (ERC) Ende Februar in Berlin fand eine Pressetour internationaler Medienvertreter statt. Auch das Ferdinand-Braun-Institut gehörte zu den ausgewählten Forschungseinrichtungen, bei der die Journalistengruppe Einblick in die Forschungsthemen des FBH bekam und den Reinraum besichtigte.

Besucht: Berliner Wirtschaftsgespräche am FBH

Am 22. März 2007 waren die Berliner Wirtschaftsgespräche e.V. zu Gast. Unter dem Motto "Neue Technologien / Forschung und Wissenschaft" präsentierte das FBH gemeinsam mit seinem Spin-off Jenoptik Diode Lab aktuelle Entwicklungen aus der Lasertechnologie. Anschließend nutzen die etwa 40 Interessierten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Kultur und Politik die Möglichkeit, einen Blick in Reinräume und Labore zu werfen.



Laborbesichtigung in der Messtechnik
Guided tour through the measurement lab

Stopover at FBH: ERC Press Tour

At the end of February in Berlin, when the European Research Council (ERC) held its kick-off conference a group of international journalists visited the FBH. As a part of ERC's supporting program, the media representatives gained an insight into FBH's research topics and visited the institute's clean room.

Visited: Berliner Wirtschaftsgespräche at the FBH

On March 22nd, Berliner Wirtschaftsgespräche e.V. were invited to visit the Ferdinand-Braun-Institut. Under the motto "new technologies / research and science" FBH together with its spin-off Jenoptik Diode Lab presented latest developments in laser technology. The more than 40 interested participants from industry, science, culture and politics subsequently used the opportunity to take a look at the clean room and various laboratories.



Kam gut an: erstes FBH-Kinderfest
Children's delight: first FBH party for the kids

Rohstoff Wissen: Neue Materialien für Licht und Kommunikation

Am 9. November 2007 diskutierten Pressevertreter, Wissenschaftler und Ausgründer aus Adlershof über neue Materialien, Technologien und innovative Produkte, darunter der FBH-Direktor Tränkle, Dr. Weyers, Abteilungsleiter am FBH und Gründer der TESAG sowie der Präsident der Leibniz-Gemeinschaft Prof. Rietschel.

Bewährt und immer wieder neu: FBH für die interessierte Öffentlichkeit

Wie in jedem Jahr beteiligte sich das FBH 2007 an Veranstaltungen, die sich an eine breite Öffentlichkeit und potenzielle Nachwuchskräfte richten. 2007 waren dies unter anderem die Lange Nacht der Wissenschaften, der Girls' Day, die Tage der Forschung und zahlreiche Veranstaltungen, die sich an ausbildungsinteressierte Jugendliche richten. Dabei achtet das FBH besonders darauf, den Interessierten neben altbewährten Elementen wie Reinraumführungen, stets auch neue Experimente und Inhalte anzubieten.

FBH für die Kleinen: Kinderfest organisiert

Anlässlich der Auszeichnung als "familienfreundlichster Betrieb Treptow-Köpenicks" 2006 hatte das FBH beschlossen, das zugehörige Preisgeld direkt in den Nachwuchs zu investieren. Daher organisierte das Institut im Juli 2007 erstmalig ein FBH-Kinderfest, zu dem der Nachwuchs aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern samt Familie eingeladen war. Viel Spaß hatten die Mädchen und Jungen aller Altersklassen mit Hüpfburg, Torwandschießen, Kinderschminken und vielen weiteren Spielen. Außerdem konnten sie bei diesem Anlass das FBH-Kinderzimmer, das zur Überbrückung von Betreuungslücken zur Verfügung steht, gleich selbst begutachten. Das Fest war ein so großer Erfolg, dass bereits viele Eltern nach der nächsten FBH-Kinderparty gefragt haben.

Feedstock Knowledge: New Materials for Light and Communications

On November 9th, FBH's Director Günther Tränkle, Dr. Weyers a Head of Department at the FBH and founder of the TESAG, and Prof. Rietschel President of the Leibniz Association were on the podium, when media representatives, scientists and founders from Adlershof discussed about new materials, technologies and innovative products.

Well Proven and Fresh Approaches: FBH for the Interested Public

In 2007, as in every year, FBH participated in events for the broad public and potential scientific offspring as for example the Night of Sciences, Girls' Day, Days of Research and further events especially for youngsters interested in industrial training. FBH particularly makes sure to offer interested people from time to time new experiments and topics in addition to well proven elements such as clean-room tours.

FBH for the Kids: Children's Party organized

When FBH was awarded to be the most family-friendly workplace in the district Treptow-Köpenick in 2006, the institute decided to spend the prize money directly for the benefit of the kids. So, in July 2007 the institute organized the first FBH children's party and invited all kids of its employees and their families. Girls and boys of all ages had great fun with the inflatable jumper, goal wall shooting, face painting and many other games. In addition, they gathered their own picture from the FBH Children's room, helping parents with child care vacancies. The party was such a big success that many parents already asked for the next kids' party.

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG **BUSINESS AREAS & RESEARCH**

Mikrowellenkomponenten und -systeme
Microwave Components and Systems

GaN-Elektronik
GaN Electronics

Diodenlaser
Diode Lasers

GaN-Optoelektronik
GaN Optoelectronics

Materialien und Prozesse
Materials and Processes

Netzwerke
Networks



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. Dabei kommen SiGe-HBT- und RF-CMOS-Prozesse externer Foundries zum Einsatz. Die am FBH entwickelten Bauelemente sind Schlüsselkomponenten für die drahtlose Kommunikation (Mobilfunk-Basisstationen, 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 -systemen 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)
- GaAs-Leistungs-HBTs (bis 15 W bei 2 GHz) mit hoher Durchbruchspannung (bis 28 V Versorgungsspannung)
- 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 GaAs- und 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 3-dimensionalen elektromagnetischen Simulation, der Transistormodellierung und

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)
- GaAs power HBTs (15 W at 2 GHz) with increased breakdown voltage (up to 28 V bias voltage)
- 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 GaAs and 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 develop-

ment. Dedicated measurement equipment allows characterization up to frequencies of 110 GHz.

Klasse-S-Schaltverstärkerkonzept für HF-Leistungsmodule mit verbesserter Effizienz

Das Klasse-S-Konzept

Die Einführung neuer Mobilfunkstandards macht die Entwicklung neuer energieeffizienter und multifunktionaler Verstärkerarchitekturen notwendig. So wird von drahtlosen Mikrowellensystemen ein immer effizienteres Leistungsmanagement verlangt. Dies betrifft nicht allein portable Terminals, sondern auch die Basisstationen. Da deren Gesamtwirkungsgrad entscheidend durch die Endstufen bestimmt wird, 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. Ein besonders innovatives Verstärkerkonzept ist das hier beschriebene Klasse-S-Konzept.

Class S Concept for High Frequency Power Amplifiers with Higher Efficiencies

Class S concept

The introduction of new radio standards motivates the development of new energy-efficient and multifunctional power amplifiers. Modern wireless transmission systems require an efficient power management. Since the overall efficiency of transmission systems is mainly determined by the final stages, power amplifiers represent a key element for the improvement of the power budget of the entire system. This applies to mobile terminals as well as to base-stations.

The need for power amplifiers achieving high efficiencies at back-off power levels accelerates the development of advanced concepts using switch-mode amplifiers, as these structures allow an efficiency of theoretically 100%. One of the most advanced switch-mode amplifier architectures, the class S concept, is presented here.

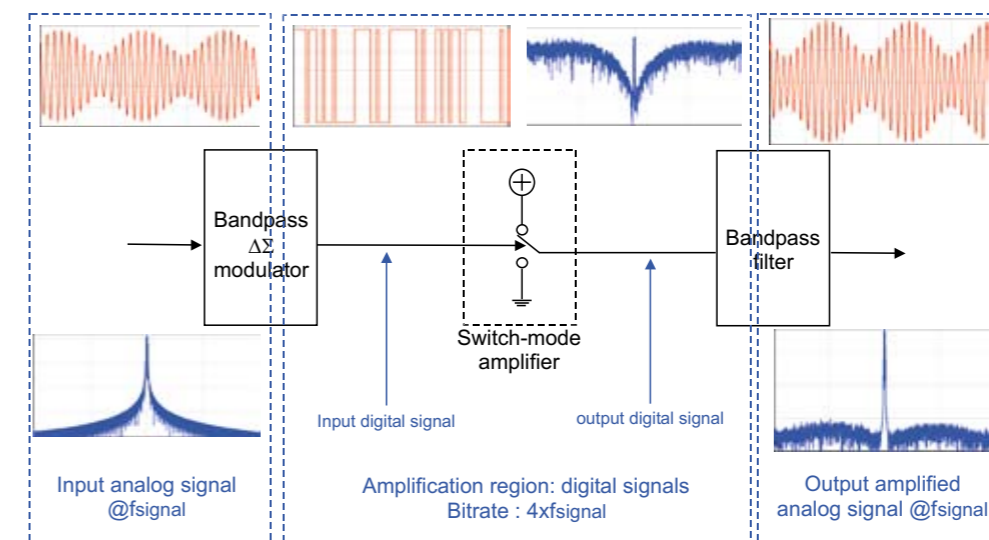


Abb. 1: Prinzip des Klasse-S-Verstärkers
Fig. 1: Block diagram of the main building blocks of the class S amplifier

Das Prinzip ist in Abb. 1 verdeutlicht. Das Eingangssignal wird mit Hilfe eines Bandpass-Modulators in ein 1-Bit-Signal umgeformt, 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.

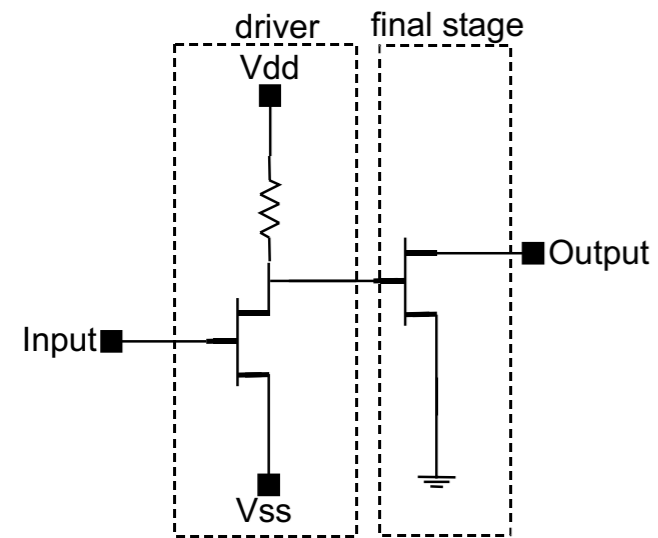


Abb. 2: Schaltbild einer GaN-Schaltendstufe
Fig. 2: Circuit diagram of a GaN HEMT switching stage

Die Schaltverstärkerstufen

Im Mikrowellenbereich stellt das Klasse-S-Prinzip besondere Herausforderungen an die Verstärkerendstufen, die schnell genug und verlustfrei schalten müssen. Im Gegensatz zu den klassischen Ansätzen sind dabei für die Klasse-S-Typen wegen der Nicht-Periodizität des Signals breitbandige Designs erforderlich. Dazu wurden am FBH auf GaAs-HBT- und GaN-HEMT-Technologien basierte Verstärker als koplanarer MMIC entworfen und realisiert. Das Schaltbild einer GaN-Variante ist in Abb. 2 zu sehen. Die Schaltung beinhaltet einen $8 \times 250 \mu\text{m}$ Endstufentransistor sowie einen Treibertransistor.

Fig. 1 presents the main building blocks of the class S amplifier. The analog input signal is converted to a digital by means of a band-pass delta sigma modulator (BPDSM). Its sampling frequency corresponds to the bit rate of the resulting digital signal, in this case 1.8 Gbps. The generated bit sequence contains the phase and amplitude information of the original analog signal. Thanks to the noise shaping of the BPDS-modulation, a notch is created around the analog signal frequency to reduce the noise in the signal band. This bit sequence is then amplified by means of a switch-mode amplifier and the analog signal is reconstructed by a filter at the output.

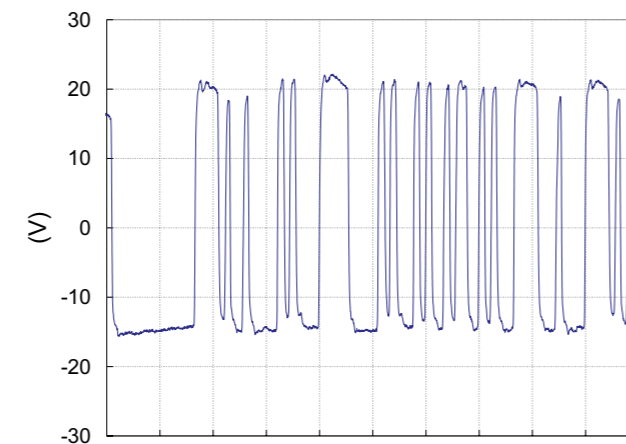


Abb. 3: Gemessenes Ausgangssignal der Schaltstufe bei 1,8 Gbit/s
Fig. 3: Measured output signal of the GaN switching stage at 1.8 Gbps

The power switching stages

In order to take advantage of the class S concept at microwave frequencies, the power stages have to achieve high-speed switching and very low losses. In addition, compared to more classical approaches, class S requires broadband operation, as the generated bit sequence is not periodic, which is, of course, more demanding in terms of transistor performance. At the FBH, GaN and GaAs-based chips capable of operating at bit rates in the 2 Gbps range have been designed and realized. Fig. 2 presents the circuit diagram of one version of a GaN-based power switching stage. The circuit uses a $8 \times 250 \mu\text{m}$ transistor as

Abb. 3 zeigt ein Beispiel der Spannungsamplituden des HF-Ausgangssignals bei 1,8 Gbit/s für einen Eingangsspannungshub von 2,5 Vpp. Die Ausgangsamplitude entspricht einer Leistung von 5 Watt. Besonders bemerkenswert ist, dass diese Endstufen eine Drain-Effizienz von über 85% mit Bestwerten bei 92% aufweisen. Der gesamte PAE-Wert (Power Added Efficiency) unter Berücksichtigung des Treiberverbrauchs beträgt 80%. Diese Werte übertreffen vergleichbare in der Literatur berichtete Resultate deutlich.

Eine Hochleistungs-Endstufe mit einem 4-mm-Ausgangstransistor ($2 \times 8 \times 250 \mu\text{m}$) erreicht eine Ausgangsamplitude von 62 Vpp. Das entspricht einer Leistung von etwa 20 Watt. Die Drain-Effizienz der Endstufe erreicht 93%. Diese Werte wurden an einer 50-Ohm-Last breitbandig ohne Klasse-S-Filter gemessen und belegen die Effizienz der MMICs. Für den Wirkungsgrad des gesamten Klasse-S-Verstärkers sind jedoch zahlreiche weitere Faktoren entscheidend, die den PAE-Wert reduzieren.

Wichtig für schnelles Schaltverhalten und eine hohe Gesamteffizienz ist die Treiberstufe, die zur Ansteuerung des Endstufentransistors einen geringen Ausgangswiderstand, breitbandiges Übertragungsverhalten und zugleich einen nur geringen Leistungsverbrauch aufweisen soll. Abb. 4 zeigt ein Beispiel für eine derartige Entwicklung; die Schaltung hat eine Drain-Effizienz von 82% bei einer Ausgangsleistung von 8,5 Watt. Das Chipfoto ist in Abb. 5 zu sehen.

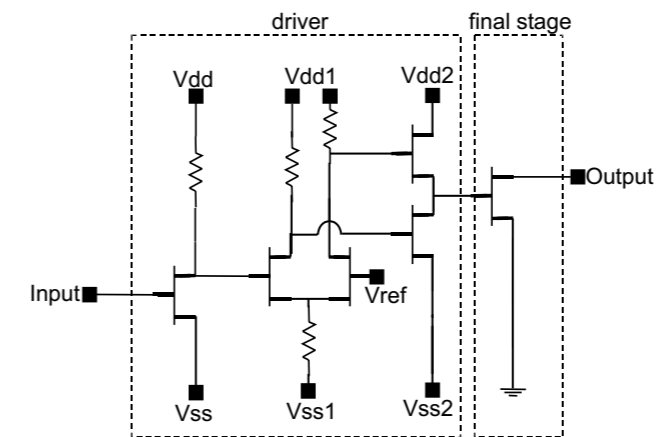


Abb. 4: Schaltbild der GaN-Schaltendstufe mit Gegentakt-Treiber
Fig. 4: Circuit diagram of the power switching stage, using a class D driver

final stage transistor and a smaller transistor for the driver stage.

Fig. 3 presents a typical output signal at 1.8 Gbps with an input amplitude of 2.5 Vpp. The measured output amplitude corresponds to an output power of 5 W. The drain efficiency was higher than 85% with highest values around 92%. The overall PAE (power added efficiency) taking into account the DC consumption of the driver was 80%. As far as is known, these are the highest values ever reported at these frequencies and power levels.

A switching stage with higher output power using a $2 \times 8 \times 250 \mu\text{m}$ output transistor has been designed and realized. It delivers an output amplitude of 62 Vpp. This corresponds to an output power of 20 W. The drain efficiency reached 93%. The output signal was measured with a 50 Ohm load at the output, and not with a class S filter. However, at first it is necessary to characterize the power switching stages with a 50 Ohm load in order to determine their efficiencies independently from other parameters. The efficiency of the whole class S system further depends on other elements.

For fast switching and high overall efficiency, the driver which has to drive the final output power transistor has to achieve a low output impedance, a broadband transmission characteristic, and at the same time a low DC-consumption. Fig. 4 shows an example of a power switching stage using an improved driver structure based on class D architecture. The circuit has been realized and measured. It achieves a drain

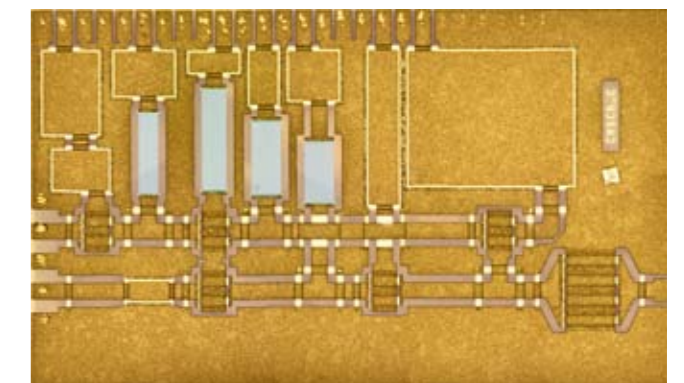


Abb. 5: Chipfoto der GaN-Schaltendstufe mit Gegentakt-Treiber
Fig. 5: Chip photo of a GaN power switching stage using class D driver

Der PAE-Wert der kompletten Schaltung mit Treiber beträgt 80%. Dieses Ergebnis zeigt die erhebliche Reduzierung des Treiberverbrauchs auf fast 0 Watt und belegt die Effizienz der gewählten Treiberstruktur. Weitere Schaltungen mit höheren Ausgangsleistungen, die auf dieser Treiberstruktur basieren, wurden entworfen und werden derzeit hergestellt. Derartige Schaltungen sind zentrale Bausteine des Klasse-S-Konzeptes. Die erzielten Ergebnisse beweisen, dass sich die GaN-Technologie ausgezeichnet für die Realisierung hocheffizienter HF-Schaltverstärker eignet.

Veröffentlichungen // Publications

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", in Proc. IMS 2008, Atlanta, USA. Accepted December 2007, published 2008.

C. Meliani, A. Wentzel, J. Flucke, E. Ersoy, J. Würfl, W. Heinrich, "GaN-HEMT Switch-Mode Microwave Power Amplifiers for Class-S Concept", in Proc. Workshop IMS 2008, Atlanta, USA. Accepted December 2007, published 2008.

A. Wentzel, C. Meliani, J. Flucke, W. Heinrich, "High-Frequency Time-Domain Measurement Technique for Class-S Amplifiers", in Proc. GeMiC 2008, Hamburg, Germany. Accepted November 2007, published 2008.

E. Ersoy, C. Meliani, I. Khalil, W. Heinrich, "On Band-Pass Delta-Sigma Modulators Suitable for Microwave Class-S Power Amplifiers", in Proc. GeMiC 2008, Hamburg, Germany. Accepted November 2007, published 2008.

J. Flucke, C. Meliani, W. Heinrich, "Advanced Hybrid Mounting Technique For A 3 GHz Class-E GaAs-Amplifier", in Proc. GeMiC 2008, Hamburg, Germany. Accepted November 2007, published 2008.

Mikrowellen-Plasmaquellen

Die Plasmaerzeugung mit Mikrowellenfrequenzen, insbesondere im 2,45 GHz-ISM-Band, eröffnet als Querschnittstechnologie eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. in der Medizintechnik, Licht- und Displaytechnik, in der Halbleiterfertigung und der industriellen Oberflächentechnik. So sollen Plasmaquellen künftig im medizinischen Bereich helfen, Hauterkrankungen wie Schuppenflechte oder Neurodermitis zu behandeln und die Wundheilung zu verbessern. Neben der etablierten Niederdruck-Plasmatechnik gewinnt der neu entstehende Bereich der atmosphä-

efficiency of 82% with an power output of 8.5 W. The chip photo is presented in fig. 5. The overall PAE of the circuit including final stage and driver is 80%. This result confirms the substantial reduction of driver consumption to nearly 0 W of the developed structure. Further circuits with higher output powers using this driver structure have been designed and are presently fabricated.

The presented circuits are necessary building-blocks for a high-efficient class S amplifier. The obtained results prove that the GaN technology is a promising candidate for the realization of high-efficient high-frequency switch-mode power amplifiers.

Microwave Plasma Sources

Plasma generation with microwave frequency, in particular in the 2.45-GHz ISM band, opens as a cross-sectional technology a huge number of applications, e.g. in medical technology, lighting engineering and display technology, in semiconductor manufacturing and industrial surface technology. Thus, plasma sources are supposed to improve wound healing and to help with skin diseases, as for example treatment of psoriasis and neurodermatitis.

Beside the established low-pressure plasma technology the emerging field of atmospheric microplasmas

rischen Mikroplasmen immer mehr Aufmerksamkeit. Im Niederdruckbereich stehen die Kosten im Fokus, das heißt hier ist die Optimierung von Effizienz, Durchsatz und Qualität gefordert. Die atmosphärischen Plasmen befinden sich dagegen in weiten Bereichen noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase vor der kommerziellen Nutzung. Es müssen grundlegende Arbeiten geleistet werden, um die Technologie für neue Märkte implementierbar zu machen oder kostengünstige Alternativen zu Niederdruckanwendungen zu schaffen.

Mikrowellenplasmen besitzen hierbei vorteilhafte Eigenschaften. Es lassen sich hohe Plasmadichten erzeugen und damit hohe Reaktionsraten erzielen. Die elektrischen Potenziale 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.

Damit diese potenziellen Vorteile in Zukunft umgesetzt werden können, werden am FBH die notwendigen Forschungsarbeiten vorangetrieben. Entscheidend ist dabei, dass die derzeit für die Plasmaanregung verfügbaren Magnetron-Mikrowellenquellen durch Halbleiteroszillatoren ersetzt werden. Magnetrons sind ab circa 300 W Leistung aufwärts verfügbar, benötigen eine Hochspannungsversorgung und eine voluminöse Mikrowellenauskopplung. Für Mikroplasmen kleiner Ausdehnung, die einen geringen 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 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 Probleme bei der Umsetzung dieses Konzeptes liegen in den komplexen und weitgehend unerforschten elektrischen Eigenschaften des Plasmas sowie im Impedanzsprung zwischen dem Leerlaufbetrieb vor der Plasmazündung und dem eigentlichen Plasmabetrieb. Darüber hinaus müssen geeignete

gains more and more attention. In the low-pressure area the costs are in the focus, which means that optimization in terms of efficiency, throughput and quality is in demand. However, atmospheric plasmas are to a large extent still in the research and development phase prior to commercial use. Basic work has to be carried out in order to make the technology ready for new markets or to create reasonable alternatives to low-pressure applications.

Here, microwave plasmas show advantageous properties. High plasma densities can be achieved and hence high reaction rates. The electric potentials are low so that the damage of sensitive electronic components can be avoided. Small ignition voltages allow the use of simple low-voltage supplies. The necessary impedance matching for plasma operation can be realized by means of small and reasonable resonator structures.

To use these potential advantages in the future, the respective research projects are pushed at FBH. It is crucial that presently used magnetron-microwave sources for plasma excitation need to be substituted with semiconductor oscillators. Magnetrons are available with an output power from approx. 300 W upward, requiring a high-voltage supply and a bulky microwave extraction unit. Whereas, for the small dimensioned microplasmas with a low power demand (1 W to < 100 W), these generators are inappropriate. The FBH works on integrated sources in which a resonator element determines the operation frequency and carries out the necessary impedance matching at the same time. A GaN power transistor from the FBH is used as active element for the oscillator. Plasma electrode, resonator and oscillator are integrated in a compact unit, needing only simple electrical low-voltage supply. The typical microwave power level is 30 W.

The problems with the realization of this concept are caused by complicated and widely uninvestigated electrical characteristics of the plasma and by the impedance step between the idle conditions before plasma ignition and the plasma operation. In addition, appropriate microwave power oscillators operating under extremely non-linear conditions need to be developed.

Mikrowellen-Leistungoszillatorschaltungen 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 Leistungoszillatoren mit ADS, Optimierung der Transistormodelle, Einarbeiten der Plasma-Impedanzdaten

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 Nutzern integrierte Mikroplasmamodule zur Verfügung zu stellen, die zuverlässig arbeiten und einfach in Anwendungen integriert werden können. Dies erfordert eine hochgradig interdisziplinäre Arbeitsweise, da die Applikationen in den verschiedensten industriellen und technologischen Bereichen angesiedelt sind. Diese Arbeiten stellen eine interessante Anwendung und Erweiterung der FBH-Aktivitäten auf dem Gebiet der III/V-Leistungskomponenten dar.

Zunächst werden die für Mikroplasmen interessanten Anregungsstrukturen hinsichtlich ihrer mikrowellentechnischen Eigenschaften messtechnisch untersucht. Daraus werden die für das Schaltungsdesign notwendigen Informationen gewonnen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Plasmaimpedanz. Diese springt beim Zünden oder Erlöschen eines Plasmas um Größenordnungen und zeigt im Plasmabetrieb erhebliche Variationen. Um diese Effekte beim Schaltungsdesign berücksichtigen zu können, ist eine genaue Kenntnis des Reflexionsverhaltens der Plasma-Anregungsstruktur notwendig. Diese wird durch die mikrowellentechnische Messung der Streuparameter (S-Parameter) gewonnen. Eine solche Messung kann jedoch nicht im Kleinsignalbetrieb durchgeführt werden, da der Plasmazustand eine Mindestleistung von typisch

These problems are addressed in several key activities:

- Microwave measuring technology: Set-up for the measurement of ignition voltages and plasma impedances
- Field calculation: Electrodynamic field calculation (3D) for the resonator optimization using standard software (Comsol), development of plasma models for the Comsol multiphysics module
- Circuit design: Improvement of the power oscillator simulations using ADS, optimization of transistor models, implementation of plasma impedance data

In future, the efficiency of the oscillators shall be improved. It is planned to realize oscillators in switch-mode technologies (e.g. Class E). Nevertheless, this is a new area and requires basic investigations of the overall system. Aim of the efforts is to develop reliable integrated microwave plasma modules which can be easily integrated into production systems. To achieve this, an extremely interdisciplinary approach is required, because the applications are spread over very different industrial and technological areas. This field opens new and attractive applications and extends FBH's activities in III-V power components.

The microwave parameters of the interesting feed structures for microplasmas are evaluated by measurements. The measurement results provide informations necessary for circuit design. A major information is the plasma impedance which jumps by orders of magnitude at ignition and termination of the plasma. It also shows considerable variations during plasma operation. To consider these effects during circuit design, an exact knowledge of the reflectance behavior of the plasma feed structure is necessary. This is obtained by microwave measurement of the scattering parameters (S parameters). Such a measurement cannot be executed under small signal conditions, because the plasma state needs a minimum output of typically several watts and the plasma always operates in a non-linear large signal state. For this reason, a special measuring set-up was implemented (fig. 1). In the center of the image a network analyzer can be seen which forms the large signal measuring system together with amplifiers, circulators and directional couplers. On the left side

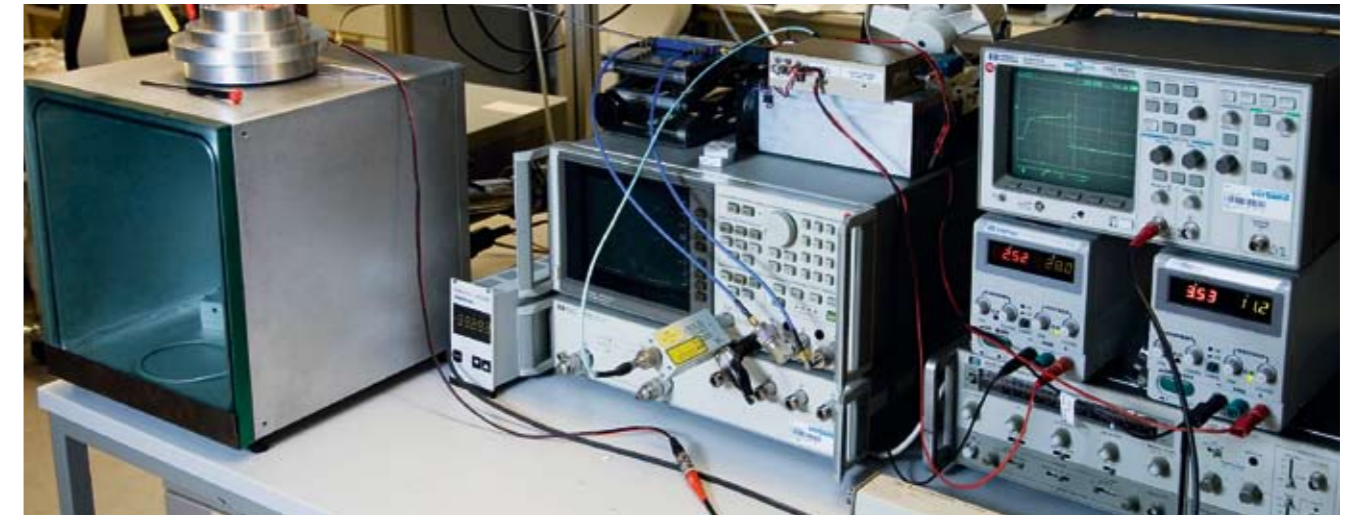


Abb. 1: Messaufbau
Fig. 1: Measuring set-up

mehreren Watt benötigt und sich das Plasma immer in einem nichtlinearen Großsignalzustand befindet. Aus diesem Grunde wurde ein spezieller Messaufbau implementiert (Abb. 1). In der Mitte der Abbildung ist ein Netzwerkanalysator zu sehen, der in Verbindung mit Verstärkern, Zirkulatoren und Richtkopplern das Großsignal-Messsystem bildet. Auf der linken Seite ist eine Unterdruckkammer erkennbar. In dieser Kammer können Plasmazündungen und Anregungen in Abhängigkeit des Gasdruckes und der Gasart untersucht werden.

Die Entwicklung und Optimierung neuer Plasma-Anregungsstrukturen wird durch numerische Feldberechnungen unterstützt. Hierzu wird das 3D-Simulationsprogramm Comsol verwendet, welches neben der Berechnung elektromagnetischer Feldverteilungen auch die Berechnung der direkt messbaren S-Parameter erlaubt. Das Programm bietet die Möglichkeit zusätzliche nichtlineare physikalische Phänomene an die Berechnung der elektromagnetischen Felder zu koppeln. Damit lassen sich prinzipiell die komplizierten zeit- und ortsabhängigen Effekte in der Plasma-Mikrowellenfeld-Wechselwirkung beschreiben. Derzeit werden die hierfür nötigen Modelle entwickelt und getestet. Abb. 2 zeigt die berechneten Felder in einem Schlitzresonator.

a vacuum chamber is visible. In this chamber plasma ignitions and feed structures can be examined as a function of gas pressure and gas composition.

The development and optimization of new plasma feed structures is supported by numerical field calculations. The 3D field simulation program Comsol is used delivering electromagnetic field distributions as well as S parameters which can be measured directly. The program offers the potential to add non-linear physical phenomena to the calculation of the electromagnetic fields. With this feature, the complicated physical effects of plasma microwave interaction can be described in principle and solved in 3D space and time. Currently, the required models are developed

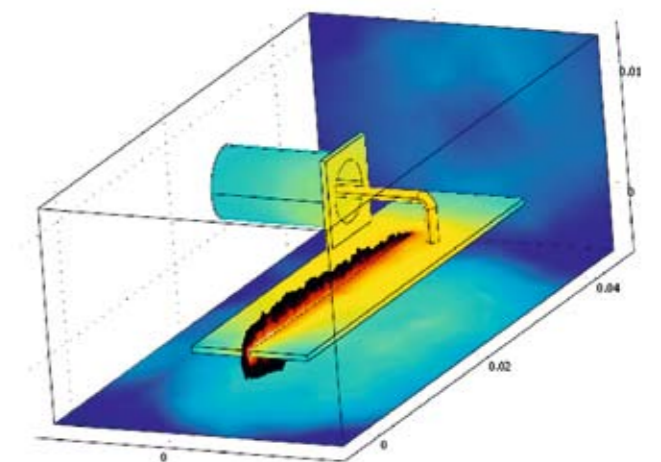


Abb. 2: 3D Berechnung des elektromagnetischen Feldes
Fig. 2: 3D electromagnetic field calculation

Für kosteneffiziente integrierte Mikroplasmaquellen werden am FBH Mikrowellen-Leistungsozillatoren entwickelt. Aufgrund der variierenden Plasmaimpedanz werden an diese Oszillatorschaltungen besondere Anforderungen gestellt. Bekannte Herangehensweisen bei der Entwicklung von Leistungsozillatoren können in diesem Fall nur sehr bedingt genutzt werden. Es müssen neue Strategien gefunden werden, wie zum Beispiel die Verwendung einer Hilfsquelle (Auxiliary Generator) bei der computergestützten Schaltungssimulation und messtechnischen Schaltungsentwicklung.



Abb. 3: Plasmaquelle für Unterdruckanwendungen
Fig. 3: Plasma source for low pressure applications

In Zukunft soll der Wirkungsgrad der Oszillatorschaltungen weiter verbessert werden, zum Beispiel durch den Einsatz von Schaltverstärker-Technologien. Die entwickelten Plasmaquellen arbeiten derzeit im Frequenzbereich der 2,45 GHz ISM-Frequenz. Andere Frequenzen sollen in Zukunft untersucht werden.

In der oberen Hälfte der Abb. 3 ist eine integrierte Plasmaquelle dargestellt, die violett leuchtend ein Unterdruck-Plasma in die darunter liegende Vakuumkammer entweichen lässt. Die Quelle nutzt zur Erzeugung des Plasmas einen integrierten Mikrowellen-Leistungsozillator mit Galliumnitrid-Transistor. Für den Betrieb der Plasmaquelle ist lediglich eine Gleichspannung von 28 V nötig.

Abb. 4 zeigt eine Atmosphären-Plasmaquelle. Auf der linken Seite tritt das atmosphärische Plasma aus der Anregestruktur heraus. Das Plasma zündet sicher unter atmosphärischen Bedingungen mit verschiedenen Prozessgasen. Die sich während des Betriebes ändernden Impedanzbedingungen

and tested. Fig. 2 shows calculated fields in a slot resonator.

To make cost-effective integrated micro plasma sources possible, microwave power oscillators are developed at FBH. Caused by the varying plasma impedance, special demands must be considered. Known approaches in the development of power oscillators are only applicable in a limited way. New strategies have to be found, as for example the use of an auxiliary source (auxiliary generator) in the computer-aided circuit simulation and when measuring test circuits.

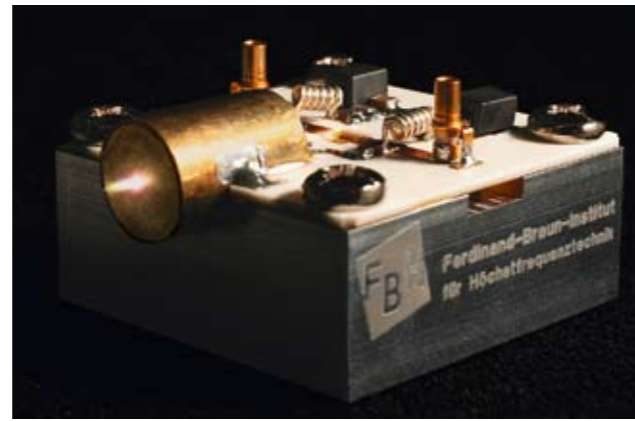


Abb. 4: Plasmaquelle an Atmosphäre
Fig. 4: Atmospheric plasma source

In the future, the efficiency of the oscillator circuits shall be further improved, for example by switching mode amplifier technologies. The developed plasma sources currently work in the ISM frequency band at 2.45 GHz. Other frequencies will be further investigated.

In the upper part of fig. 3, an integrated plasma source is visible feeding a violet low pressure glow discharge into the underneath vacuum chamber. To produce the plasma, the source uses an integrated microwave power oscillator with a gallium nitride transistor. To operate the plasma source, only a 28 DC power supply is needed.

Fig. 4 shows an atmospheric plasma source. On the left side the atmospheric plasma leaves the plasma resonator. The plasma can be ignited under atmospheric conditions using different process gases. The impedance changes during operation are compensated by the oscillator circuit. These integrated,

werden von der Oszillatorschaltung kompensiert. Die Abmessungen der gezeigten Quelle entsprechen in etwa denen einer Streichholzschachtel. Dieser Aufbau stellt den Stand der Technik in Bezug auf integrierte, bei Atmosphäre arbeitenden Low-Power-Mikrowellen-Plasmaquellen dar.

Veröffentlichungen // Publications

S. Kühn, C. Andrei, R. Gesche, "On the Ignition Voltage Behavior of Microwave Microplasmas", Proceedings of the 37th European Microwave Conference, October 2007, Munich Germany, pp. 616-619.

THz-Transistoren in Transfer-Substrat-Technologie

In jedem elektronischen High-Tech-Produkt steckt eine Vielzahl von Transistoren. Ihre Fähigkeit, immer höher frequente Signale zu verarbeiten, beschleunigt nicht nur Prozesse, es können auch völlig neuartige Anwendungen erschlossen werden. Dadurch werden die bislang kaum genutzten, hohen Frequenzen im Terahertzbereich (THz) zunehmend attraktiver.

In diesen Bereich ist das FBH nun mit der Entwicklung von Elektronikkomponenten für integrierte Höchstfrequenzschaltungen (MMICs) vorgedrungen. Langfristiges Ziel ist es, im elektromagnetischen Spektrum die Lücke im Bereich von 0,1 bis 10 THz zwischen Elektronik und Optik zu erschließen. Mit dem Zugang zu diesem Frequenzfenster kann die Auflösung herkömmlicher Radarsysteme deutlich gesteigert und verborgene Dinge können aufgrund der spezifischen Absorptions- und Transmissions-eigenschaften sichtbar gemacht werden. Diese bildgebenden Systeme können in der industriellen Qualitätssicherung, der Medizin- und Sicherheitstechnik eingesetzt werden. Da die Terahertzwellen sowohl Verpackungen als auch Kleidung durchdringen, können beispielsweise Sicherheitskontrollen auf Flughäfen künftig verbessert werden. Eine weitere Anwendung liegt in der hochbitratigen drahtlosen Kommunikation.

In der Stepper-Lithographie-Linie am FBH wurde dazu ein neuartiger Transfer-Substrat-Prozess (TS) auf Basis von InP-Hetero-Bipolar-Transistoren (HBT)

atmospheric low-power microwave plasma sources are state-of-the-art and the dimensions of this source are just as big as a match box.

THz-Transistors in Transferred Substrate Technology

Behind the scenes, a great variety of transistors ensure the functionality of any electronic high-tech product. The capability of transistors to process increasingly higher signals does not only speed up processes but also enables innovative applications. Along with the access, the so far scarcely used high frequencies in the terahertz (THz) range gain attractiveness.

FBH now entered the THz field by developing electronic components for monolithic microwave integrated circuits (MMIC). Long-term aim is to open up the gap from 0.1 to 10 THz of the electromagnetic spectrum, the almost unutilized range between electronics and optics. By accessing this frequency range, the resolution of radar systems can be significantly improved and hidden objects can be uncovered due to their specific absorption and transmission properties. These imaging systems can be employed in industrial quality assurance, medical technology and security engineering. As terahertz waves penetrate packaging as well as clothing, e.g. airport security can be improved in the future. Further applications are in high bit-rate wireless communications.

A novel transferred substrate process (TS), based on InP hetero-bipolar transistors (HBT) has been developed in FBH's stepper-lithography line. It enables optimized designs of the HBTs and serves as a technology platform for complex micro integration. Processing starts analog to conventional HBT fabrica-

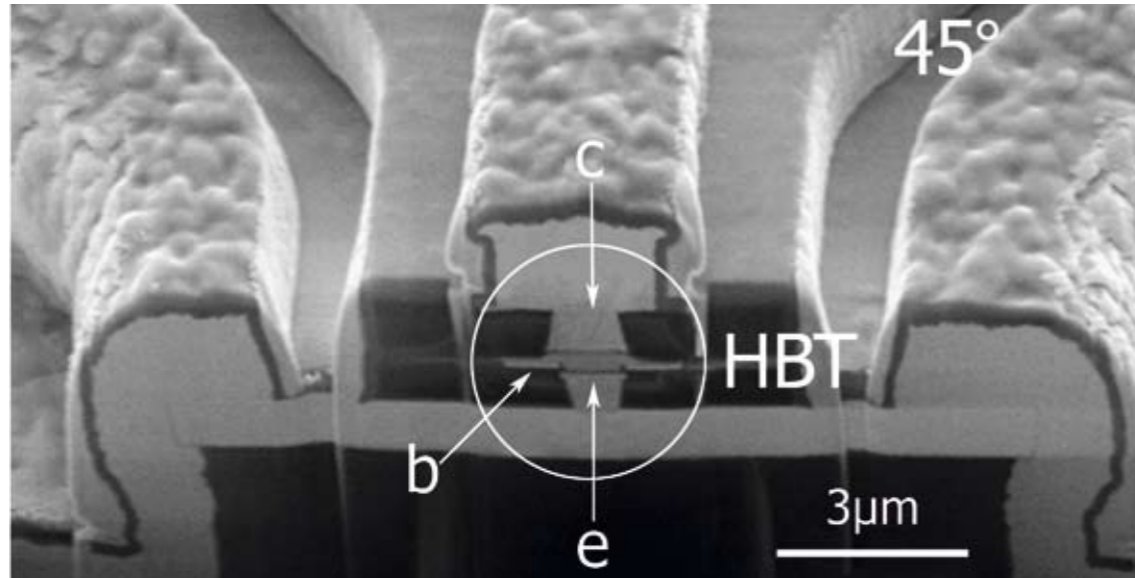


Abb. 1: FIB Querschnitt eines TS HBT
Fig. 1: FIB cross-section of a TS HBT

entwickelt. Das Verfahren erlaubt einen optimierten Zuschnitt des Bauelements und dient als Technologie-Plattform zur komplexen Mikrointegration. Der Prozess beginnt wie bei der Herstellung konventioneller HBTs. Die Emittergrößen liegen bei $0,8 \times 5 \mu\text{m}^2$, die selbstausgerichteten Basiskontakte erstrecken sich je $0,6 \mu\text{m}$ breit um den Emitter. Mit der Planarisierung der Bauelemente durch Benzocyclobuten (BCB) schließt der Prozess auf der Vorderseite ab. Dann wird die strukturierte Seite der halbseitig prozessierten HBTs auf dem 3" InP-Substrat mittels einer $2 \mu\text{m}$ dicken BCB-Polymerschicht auf eine Aluminiumnitrid-Keramik geklebt. Das Epitaxiesubstrat wird nasschemisch entfernt und damit die Rückseite der Epitaxieschichten freigelegt. Anschließend wird die Kollektorseite der gewendeten HBTs mittels Stepper-Lithographie strukturiert. Die Fehlausrichtung von Vorder- zu Rückseitenstrukturen über den 3" Wafer beträgt weniger als 100 nm und entspricht damit den Spezifikationen konventioneller Stepper-Lithographie, siehe Abb. 1. Durch Entfernen des Epitaxiesubstrats ermöglicht das innovative Bauelementkonzept den justierten, lithographischen Zugang zur Vorder- und Rückseite des HBTs. Damit können dominante parasitäre Kapazitäten des Transistors auf ein Minimum reduziert werden. Gleichzeitig wird eine thermisch- und hochfrequenz-optimierte Peripherie aufgebaut. NiCr-Widerstände auf dem Aluminiumnitrid-Substrat und

tion. Emitter contact widths are around $0.8 \times 5 \mu\text{m}^2$. The self-aligned base contacts extend $0.6 \mu\text{m}$ on each side of the emitter metal. Planarization of the device via benzocyclobute (BCB) completes the process on the front side. The structured side of the semi-processed HBTs on the 3" InP substrate is bonded onto an aluminum nitride ceramic via a $2 \mu\text{m}$ layer of BCB. The removal of the epitaxial substrate uncovers the back side of the epitaxial layers. Afterwards the collector of the flipped HBTs is defined congruent to the emitter from the back side by stepper lithography, see fig. 1.

The front to back side alignment error of less than 100 nm over the 3" wafer is within the stepper specs for a conventional process. Thus, the innovative concept provides an aligned lithographic access to front and back side of the HBT. The resulting linear device set-up relaxes design trade-offs and eliminates dominant parasitic transistor capacitances, speeding up the HBT. At the same time, the high frequency and thermal performance of the periphery is optimized. NiCr resistors on the aluminum nitride ceramic and SiNx capacitances complete the MMIC process.

The multi-level metalization scheme of the TS process almost comes along with the device set-up. It offers three major wiring layers, separated by BCB, as well as cross connections to each other and to the trans-

SiNx-Kapazitäten schließen den MMIC-Prozess ab. Mit dem TS-Prozess liegen bereits drei Hauptmetallisierungsebenen vor, die sich auch wechselseitig miteinander verbinden lassen. Diese können für eine mehrlagige Leitungsführung und den Aufbau der Mikrostrip-Peripherie genutzt werden. Vias bieten die Option, Funktionselemente auf dem Transfer Substrat zu kontaktieren. Damit ermöglichen der TS-Prozess den Aufbau dreidimensional integrierter Schaltungen auch unterschiedlicher Materialsysteme und erweitert die Funktionalität der Bauelemente.

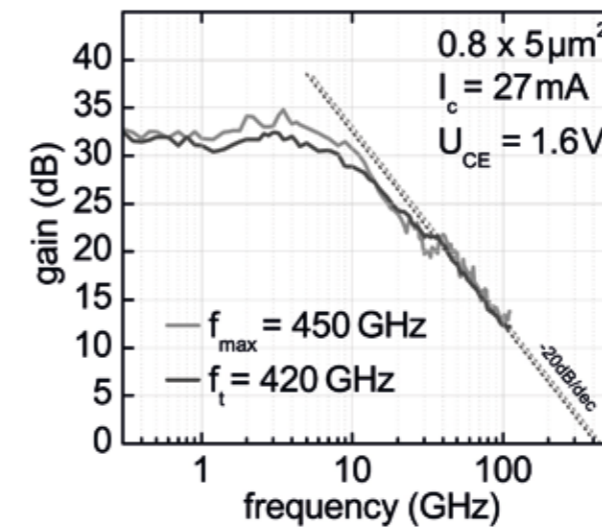


Abb. 2: Extrapolierte f_t und f_{max} eines TS-HBT
Fig. 2: Extrapolated f_t and f_{max} of a TS HBT

Resultate

Abb. 2 zeigt die Kurzschlussstromverstärkung ($I_{h_{21}} I^2$) und maximale unilaterale Leistungsverstärkung (MUG) eines Transfer-Substrat-HBTs. Mittels $0,8 \mu\text{m}$ -Emitter-Lithographie werden Transitfrequenzen $f_t = 420 \text{ GHz}$ (Stromverstärkung wird 1) und maximale Schwingfrequenzen $f_{\text{max}} = 450 \text{ GHz}$ (Leistungsverstärkung wird 1) erreicht.

Der Asterisk in Abb. 3 markiert den optimalen Arbeitspunkt der Hochfrequenzmessungen. Aus dem Ausgangskennlinienfeld des HBT ergibt sich eine Durchbruchspannung von $BV_{\text{CEO}} = 4,5 \text{ V}$ und ein maximaler Kollektorstrom von 72 mA . Das entspricht einer Kollektorstromdichte von $18 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$. Ausgangsleistungen im Gleichstrombetrieb über 100 mW spiegeln die exzellente thermische Anbindung wider.

fer substrate. Within three-dimensional integrated circuits the vias can also provide wiring to operational elements on the transfer wafer. Thus, a construction kit for manifold three-dimensional configurations is available to support functionality of the active devices.

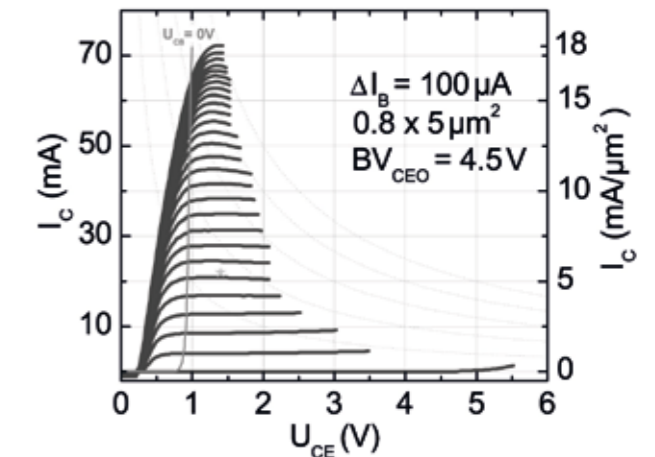


Abb. 3: Ausgangskennlinienfeld eines TS-HBT
Fig. 3: Common emitter I-V plot of a TS HBT

Results

Fig. 2 shows the short circuit current gain ($I_{h_{21}} I^2$) and maximum unilateral gain (MUG) of a transferred substrate HBT. Transistors with extrapolated cut-off frequency of $f_t = 420 \text{ GHz}$ (current gain reaches unity) and maximum oscillation frequency of $f_{\text{max}} = 450 \text{ GHz}$ (power gain reaches unity) were realized via $0.8 \mu\text{m}$ emitter lithography.

The asterisk in fig. 3 indicates the optimal biasing for high frequency performance. The common emitter I-V plots of the HBT demonstrate a breakdown voltage of $BV_{\text{CEO}} = 4.5 \text{ V}$ and a maximum collector current of 72 mA , corresponding to $18 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$. A DC peak power over 100 mW reflects excellent heat sinking. The devices feature consistent large signal modeling and homogeneous characteristics over the 3" wafer.

Die Transistoren weisen homogene Eigenschaften über den 3" Wafer auf und lassen sich konsistent im Großsignalmodell beschreiben.

Abb. 4 zeigt einen 4-stufigen Wanderwellenverstärker in Transfer-Substrat-Technologie. Der Breitbandverstärker in Mikrostrip-Umgebung mit darunter liegender Masseebene leistet 12 dB bis zu einer Grenzfrequenz von $f_c = 70$ GHz innerhalb des 3 dB Bandes.

The photo in fig. 4 shows a 4-stages traveling wave amplifier in transferred substrate technology. The broadband amplifier in a microstrip set-up with common ground plane underneath generates 12 dB gain up to a cut-off frequency of $f_c = 70$ GHz within the 3 dB band.

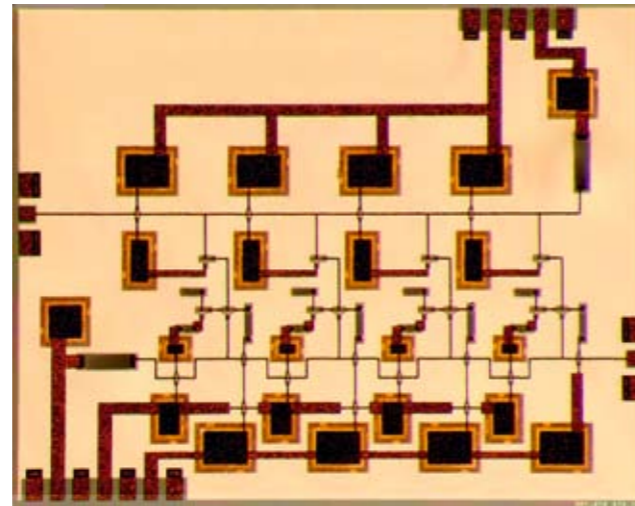


Abb. 4: Wanderwellenverstärker in Transfer-Substrat-Technologie
Fig. 4: Traveling wave amplifier in transferred substrate technology

Veröffentlichungen // Publications

T. Kraemer, F. Lenk, A. Maaßdorf, H. J. Wuerfl, G. Traenkle, "High Yield Transferred Substrate InP DHBT", Indium Phosphide & Related Materials, Proc., Matsue, Japan, 14-18 May 2007, pp.: 407 - 408.

■ Fortschritte in der Finite-Differenzen-Methode im Frequenzbereich (FDFD): Minimierung numerischer Probleme in der Anwendung von PML-Wänden

Um die Funktion einer Hochfrequenzschaltung umfassend zu verstehen, ist die Simulation der elektromagnetischen Vorgänge notwendig. Der Aufbau und die Verbindung von komplexen Hochfrequenzschaltkreisen unter Berücksichtigung ihrer Umgebung erfordert in einer elektromagnetischen (EM-) Simulation eine zusätzliche mathematische Behandlung. Absorbierende Randbedingungen erlauben die Simulation

■ Advancing the Finite-Difference Method in Frequency Domain (FDFD): Minimizing PML-Related Numerical Problems

For a thorough knowledge of the functionality of RF circuits, simulations of the electromagnetic behavior are inevitable. Packaging and connecting of RF circuits under consideration of their environment requires an additional treatment in the electromagnetic (EM-) simulation. Absorbing conditions at the boundary of an analogue model allow to simulate a replacement of the open region (the outer space) surrounding the investigated electronic parts by implementing

eines Modells bei dem das offene Gebiet (der äußere Raum) durch eine Wand mit bestimmten Eigenschaften ersetzt ist. Regeln für die Anwendung dieser absorbierenden Wände sind untersucht worden und werden vorgestellt.

Die Forschung des FBH auf dem Gebiet der EM-Simulation schließt auch die Arbeiten an dem selbst entwickelten Programmpaket F3D, basierend auf der Finite-Differenzen-Methode im Frequenzbereich, ein. Dieses Softwarepaket wurde in den letzten Jahren wesentlich erweitert und optimiert. Im Gegensatz zum Zeitbereichsverfahren wird im Frequenzbereich ein großes System von Gleichungen mit Hilfe eines Iterationsverfahrens gelöst. Aufgrund des hohen numerischen Zeitaufwandes bei iterativen Verfahren liegt ein Hauptaugenmerk bei der Weiterentwicklung auf schnellen mathematischen "Solver".

Neue Verfahren können dabei die Eigenschaften des mathematischen Lösungsaufwandes verschlechtern. Ersetzt man in einer EM-Simulation den offenen Raum durch die bis dato effektivste Möglichkeit einer absorbierenden "Perfectly-Matched-Layer" Wand (PML-Wand in Abb. 1.1), müssen Vor- und Nachteile beachtet werden.

special walls with defined properties. Rules for the application of such walls were investigated in this work and will be presented.

FBH's research in electromagnetic simulation includes work on an in-house software package F3D based on the finite-difference method in frequency domain (FDFD), which has been optimized significantly over the last years. In contrast to its time-domain counterpart, the FDFD method involves a large system of equations, which needs to be solved iteratively. Because of the related high numerical efforts, this step forms a key part of the FDFD approach.

The so-called Perfectly Matched Layer (PML) (fig. 1.1) is presently the most powerful absorbing boundary condition. On the one hand it allows extending the periphery of the structure virtually to infinity and on the other hand, it truncates the structure in order to keep the calculation domain small enough. The anisotropic material approach is used here, with anisotropic artificial electric and magnetic conductivities, leading to a tensor description of permeability and permittivity. A structure with three PML walls

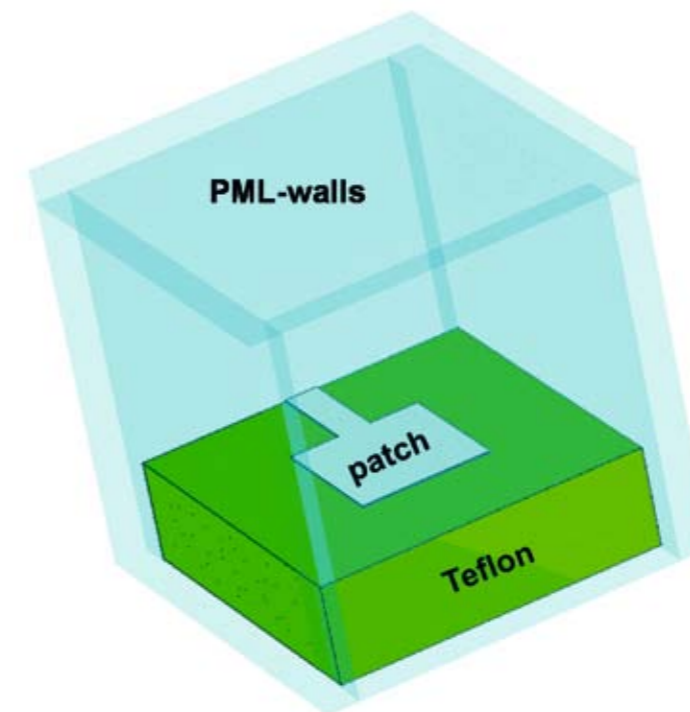
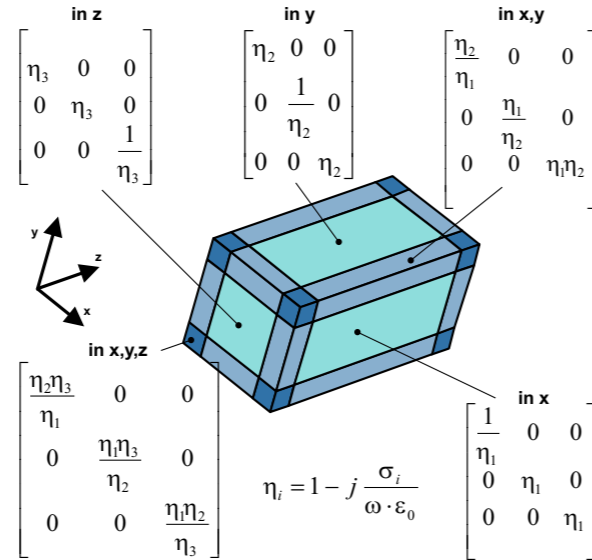


Abb. 1.1: Modellierung des offenen Raumes durch absorbierende Randbedingungen (PML) am Beispiel einer Patch-Antenne
Fig. 1.1: Replacing the open boundaries of a patch antenna structure with PML to emulate open space

Abb. 1.2: Tensoren $[\eta]$ einfacher und überlappender PML Wände. σ_i definiert das künstliche Material.
Fig. 1.2: PML Tensors $[\eta]$ for PML walls in three directions. σ_i denotes the artificial conductivities (electrical) of the respective PML wall.



Als Vorteil ist zu sehen, dass eine unendlich ausgehende Struktur reduziert und limitiert werden kann und so die Zellenzahl begrenzt wird. Der Nachteil steckt im Aufbau der PML-Wände, die durch ihr anisotropes Material (mit künstlichen Leitfähigkeiten) einen Tensor mit stark unterschiedlichen Elementen erzeugen. Der Aufbau des Tensors bei einfachen und überlappenden PML-Wänden ist in Abb. 1.2 gezeigt.

Der Aufbau dieser Materialtensoren ist deshalb so notwendig, um neben dem offenen Raum auch gleichzeitig die Maxwell'schen Gleichungen zu erfüllen. Allerdings wird die Matrixkondition durch den Wertebereich der Tensorelemente deutlich verschlechtert. Dies kann zu hohen Rechenzeiten aufgrund stark steigender Iterationszahlen führen. Durch geeignete Wahl der PML-Wände ist es aber möglich, diese Verschlechterungen minimal zu halten. Die erste Regel fordert dabei, dass sich die PML-Wände nicht überlappen.

Der Grund hierfür liegt in den Elementen der Tensoren, die bei überlappenden PML-Wänden, absolut und relativ, extrem große Abweichungen von den übrigen Elementen der Matrix aufweisen. Mehrere intensive Untersuchungen und Vergleiche von Strukturaufbauten und den zugehörigen Matrixelementen zeigen, dass bei Anwendung von PML-Wänden mit nicht überlappendem Aufbau noch die günstigsten Zahlenbereiche für die Matrixelemente erreicht werden. In Abb. 3.1 wird gezeigt, wie sich überlappende und nicht überlappende PML-Wände auf die Anzahl der Iterationen auswirken.

Das zweite wichtige Ergebnis ist eine Eigenschaft, die sich aus der Diskretisierung der Struktur ergibt und ebenfalls eine starke Einwirkung auf die Anzahl der Iterationen hat. Die Untersuchungen anhand sehr unterschiedlicher Strukturen von Mikrostreifen- und Koplanarleitungsaufbauten wie Patch-Antenne, Flip-Chip-Verbindungen, Spiralinduktivitäten zeigen einen interessanten Effekt: Wählt man die Diskretisierung

and corresponding overlapping regions in the edges and corners of the computational domain is given in fig. 1.2 together with the respective tensor notation.

However, the benefits of PML do not come for free. Compared with the scalar formulation, the material tensors worsen the numerical properties of the system of equations to be solved, which results in increased CPU time for the iterative solution. Generally, the deterioration strongly depends on the number and parameters of the PML layers and it particularly occurs if PML layers overlap, e.g. at the edges and corners of the outer boundary of the computational domain. The purpose of this work was to analyze these effects and to explore modifications reducing the numerical efforts. It is found that the overlapping PML regions make the usage of the PML boundary condition almost impossible for most practical microwave structures. After several intensive investigations and testing of different approaches it turned out, that avoiding any overlapping is the best way to keep the high count of the number of iterations for the numerical solver low (reduction by a ratio of 65 as given in fig. 3.1).

The second result is, that PML cell size constitutes the most important parameter regarding convergence of the iterative solution. The investigations on various microstrip and coplanar structures like patch antenna, flip-chip interconnects, spiral inductors reveal an interesting effect: By making the PML cell sizes the largest cell sizes in the whole mesh, the iteration

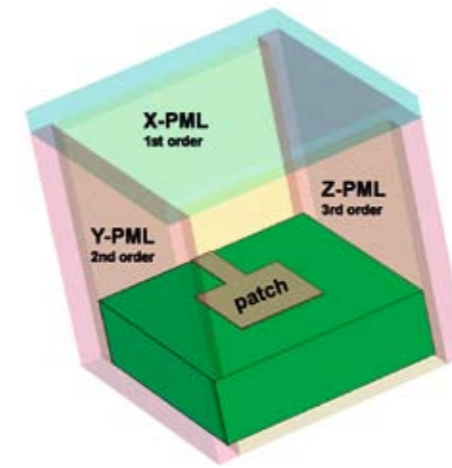
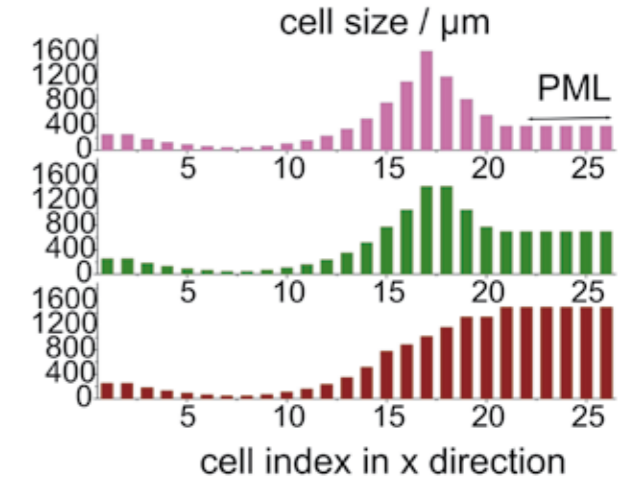


Abb. 2: Patch-Antenne mit nicht überlappenden PML Wänden, jeweils bestehend aus fünf Schichten (links). Drei unterschiedliche Diskretisierungsarten in x-Richtung senkrecht zur Patch-Antenne (rechts).
Fig. 2: Patch antenna with PML walls of 5 layers are placed in x, y and z directions (left). Three different discretizations of the patch antenna in the x direction (right).



so, dass die größten Zellen in den PML-Wänden liegen, dann kann die Anzahl der Iterationen ebenfalls gesenkt werden. Diese zweite Regel führt zu teilweise drastischen Iterationseinsparungen (Abb. 3.2). Zusammenfassend gilt: die Anwendung von PML-Wänden verschlechtert die Matrixkondition, aber der Einfluss auf den numerischen Aufwand wird durch zwei einfach anzuwendende Regeln beim Aufbau und der Diskretisierung der PML-Wände begrenzt.

level can be lowered drastically (fig. 3.2). This opens a relatively simple and very effective method to improve the numerical properties of the FFD approach when using PML. Concluding: the application of PML walls worsens the matrix condition of the FFD system, but the influence on numerical efforts can be limited by two simple rules to obey in the PML walls scheme and discretization.

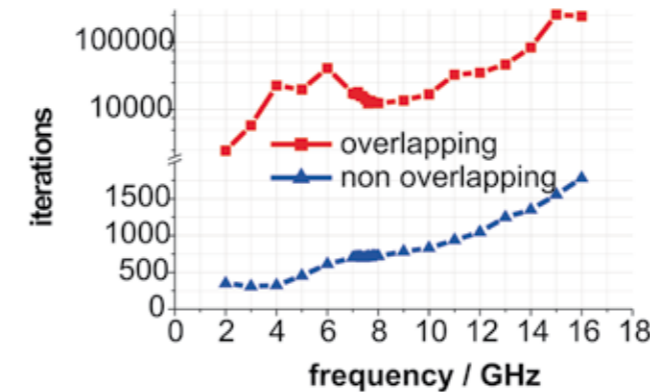


Abb. 3.1: Anzahl der Iterationen bei einer Patch-Antenne mit x- und z-PML-Wänden und überlappendem bzw. nichtüberlappendem Aufbau
Fig. 3.1: Number of iterations for simulation of the antenna in fig. 2 as a function of frequency, using overlapping and non-overlapping PML walls (only x- and z-PML walls are used)

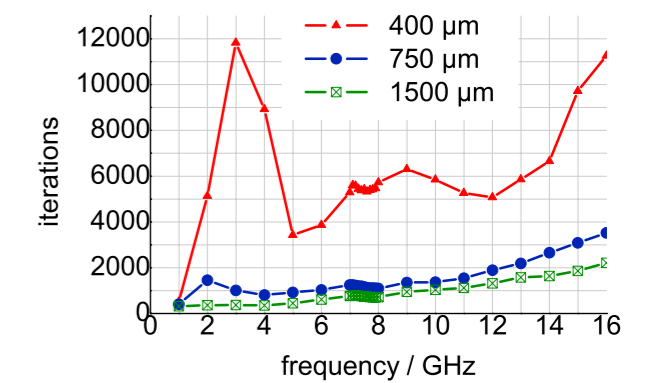


Abb. 3.2: Anzahl der Iterationen für die Patch-Antenne mit unterschiedlichen Diskretisierungen in z-Richtung gemäß Abb. 2 links
Fig. 3.2: Number of iterations for the different discretizations (and thus PML cell sizes) in x-direction according to fig. 2 (left)

Veröffentlichungen // Publications

Talukder, P., Schmückle, F.J., Heinrich, W., "Optimizing the FFD Method in Order to Minimize PML-Related Numerical Problems", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Honolulu Hawaii USA, June 3-8, 2007, Pg.: 293-296.

Modellierung von GaN-HEMTs und GaAs-HBTs

Transistormodelle sind die Grundlage der Schaltungssimulation. Dies gilt in besonderer Weise im Hinblick auf den Entwurf monolithisch integrierter Schaltungen. Am FBH werden die kompakten Transistormodelle kontinuierlich weiterentwickelt und an die im Institut entwickelten innovativen Transistortechnologien angepasst.

Modellierung von GaN-HEMTs

Das FBH GaN-HEMT-Modell basiert auf dem Chalmers (Angelov) Modell. Die Parameter werden in einer semianalytischen Methode schrittweise bestimmt, wodurch gewährleistet ist, dass den extrahierten Werten auch physikalische Bedeutung zukommt. Die Basis bilden extensive DC-, S-Parameter und gepulste Messungen ebenso wie in einem breiten Bias-Bereich analytisch bestimmte Kleinsignalparameter. Zunächst wird das Modell für eine kleine Transistor-Einheitszelle bestimmt. Der so erhaltene Parametersatz dient als Ausgangspunkt für das skalierbare Modell, das HEMTs unterschiedlicher Größe mit großer Genauigkeit beschreibt.

Neben der Transistor-Modellierung für den Entwurf klassischer linearer Leistungsverstärker in den Verstärkerklassen A oder AB liegt der Schwerpunkt auf den Schalt-Verstärkerklassen D und S. Die Anforderungen an das Modell unterscheiden sich für die beiden Fälle deutlich. Während bei linearen Verstärkern der aktive Bereich des Kennlinienfelds sehr genau beschrieben sein muss, verlangt die Simulation der Klassen D und S eine verlässliche Beschreibung des Schaltverhaltens. Dies bedeutet, dass der gesperrte Zustand und die lineare Region des Kennlinienfeldes sehr genau modelliert sein müssen, wohingegen der aktive Bereich von geringerer Bedeutung ist, da er schnell durchlaufen wird. Die Genauigkeit der simulierten S-Parameter kann beispielsweise nur im Hinblick auf lineare Verstärker als guter Indikator angesehen werden, nicht hingegen für Schaltverstärker.

Das Schaltverhalten der HEMTs muss experimentell charakterisiert werden, um das entsprechende Modell zu bestimmen. Für diesen Fall wird die Antwort des HEMT auf eine Impulsfolge im Zeitbereich gemessen. Abb. 1 zeigt den Vergleich von Messung und Simulation. Es handelt sich um das Ausgangssignal eines differentiellen Paares von zwei $8 \times 250 \mu\text{m}$ HEMTs im $50\text{-}\Omega$ -System, das einem Current-Mode Class-D-Ver-

Advances in GaN HEMT and GaAs HBT Modeling

Transistor models are the basis of circuit simulation. Especially with respect to the design of monolithically integrated circuits, highly accurate models are vital. At the FBH, the compact models undergo permanent improvement in order to keep track with the development of innovative transistor technologies.

Modeling of GaN HEMTs

The FBH GaN HEMT model is based on the Chalmers (Angelov) model. FBH relies on a semi-analytic step-by-step extraction routine in order to ensure that the model parameters are of physical significance. The large-signal model extraction is based on extensive DC, S parameter and pulsed measurements, and also on analytically determined multi-bias small-signal equivalent circuit elements. Initially, the scalable model is determined by fully characterizing a small unit-cell transistor. The parameters obtained for this device are the starting point for deriving a scaled set of parameters that yields a good model performance for transistors of different sizes.

Apart from modeling transistors for classical linear power amplifiers (PAs) operating in classes A or AB, FBH's work focuses on models for the design of class D and class S switch-mode amplifiers. The requirements are quite different for these two cases. While it is mandatory to describe the active regime well in case of linear amplifiers, class D and S require the switching behavior to be predicted well. This means that, in the latter case, the focus lies on the description of the off-state, the linear region, and on the transitions between both, while e.g. the representation of S-parameters in the normal active region is of negligible importance.

As a consequence, one needs to characterize the switching behavior of the HEMT experimentally if the model shall be useful for switch-mode PA design. This is done by applying a pulse-train to the device and measuring its response in time domain. Measurement and model performance are compared in fig. 1. The diagram shows the response of a differential pair of two $8 \times 250 \mu\text{m}$ HEMTs in a 50Ω system, which closely resembles a current-mode class D topology without output filter. An important detail of the characterization is that the input signal is a non-periodic bit sequence so that

stärker ohne Ausgangs-Filter entspricht. Ein wichtiges Detail ist, dass das Eingangssignal nicht periodisch ist, wie es auch dem Fall eines Verstärkers der Klasse S entspricht. Die gute Übereinstimmung von Messung und Simulation zeigt, dass das GaN-HEMT-Modell auch für den Entwurf von Schaltverstärkern gut geeignet ist.

the results are valid also for a class S configuration. The agreement between simulation and measurement is very close, as shown in the figure. This proves that the model is well suited for switch-mode PA design.

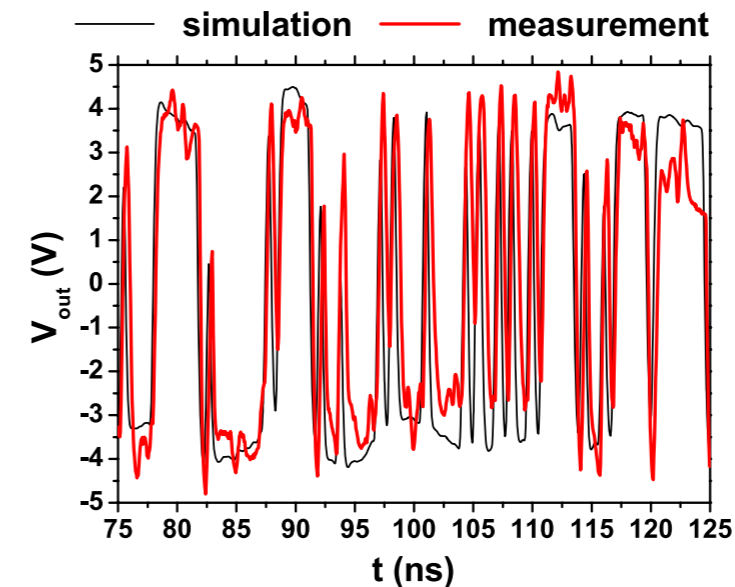


Abb. 1: Ausgangssignal eines differentiellen Paares GaN-HEMT ($8 \times 250 \mu\text{m}$). Vergleich von Simulation (schwarze Linie) und Messung (rote Linie).
Fig. 1: Output signal for GaN HEMT ($8 \times 250 \mu\text{m}$) differential pair. Simulation (black line) vs. measurement (red line).

Großsignal-Rauschmodell für GaAs-HBTs

Rauschmodelle als Teil eines Transistormodells werden benötigt, um auch die Rauscheigenschaften von Schaltungen bestimmen zu können. Generell gut etabliert sind dabei Kleinsignal-Modelle für fast alle Typen von Transistoren. Diese Art von Modellen beschreibt nur die Rauscheigenschaften für einen gegebenen Arbeitspunkt unter Kleinsignal-Bedingungen, was für den Entwurf rauscharmer Verstärker oftmals ausreichend ist. Großsignal-Rauschmodelle unterliegen dieser Einschränkung nicht. Sie erlauben z. B. die Optimierung des Arbeitspunktes eines rauscharmen Verstärkers oder die Simulation des Rauschens nichtlinearer Schaltungen wie Oszillatoren.

Obwohl ein genaues Großsignal-Rauschmodell für Heterobipolar-Transistoren (HBTs) für viele Anwendungen gebraucht würde, war es bisher noch nicht verfügbar. Ein vom FBH vorgestellter neuer Ansatz die

Large-Signal Noise Model for GaAs HBTs

Noise models are required as a part of a transistor model in order to simulate the noise performance of a circuit. It is generally well established how to describe the noise for small-signal operation for most devices. The validity of these models is restricted to one bias point and small signal amplitudes which in general is fully sufficient for the design of low-noise amplifiers. Large-signal noise models overcome these restrictions and allow for optimizing the bias of a linear circuit or to simulate noise in nonlinear circuits like oscillators. However, accurate large-signal noise models for heterojunction bipolar transistors (HBTs) were, so far, highly desirable but not available. The FBH proposed a new approach to easily integrate shot noise into a large-signal model that overcomes the previous limitations and thereby advances the state-of-the-art in this field.

Schrotrauschquellen in das Großsignal-Modell zu integrieren, überwindet die bisherigen Einschränkungen der Genauigkeit und erweitert den Stand der Wissenschaft in diesem Bereich.

Es ist bekannt, dass die Schrotrauschquellen eines HBTs korreliert sind, und dass die Korrelation durch die intrinsische Laufzeit abgeschätzt werden kann. Die Schwierigkeit bestand bisher darin, dass diese Laufzeit nicht einfach vorhersagbar ist. Sie musste selbst dann aus Rauschmessungen bestimmt werden, wenn das Kleinsignal-Modell bekannt war. Der Großsignalfall ist noch komplizierter, da die Korrelation vom Arbeitspunkt abhängt. Aus diesem Grund vernachlässigen Großsignal-Modelle die Korrelation üblicherweise ganz.

It is well known that the two shot noise sources of the HBT are correlated, and that this correlation can be approximated by the intrinsic transit time. The drawback so far was that this intrinsic time constant is not easily predicted. Thus, it had to be extracted from noise measurement in the small-signal case, even if the full small-signal model is known. The large-signal case is even more involved, since the correlation time constant is a function of bias. This is the reason why large-signal models so far commonly simply neglect the correlation completely.

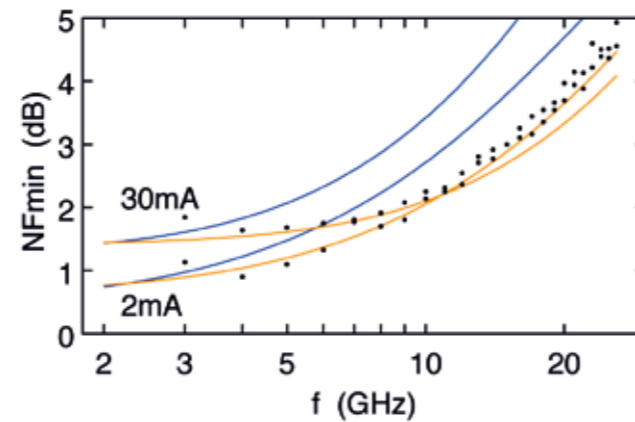


Abb. 2: Minimale Rauschzahl NF_{min} eines $3 \times 30 \mu m^2$ HBT bei $V_{ce} = 1 V$
Fig. 2: Minimum noise figure NF_{min} of $3 \times 30 \mu m^2$ HBT at $V_{ce} = 1 V$

Abb. 2 zeigt die minimale Rauschzahl NF_{min} eines $3 \times 30 \mu m^2$ HBT in zwei Arbeitspunkten. Der Einfluss der Korrelation ist deutlich zu erkennen, da die Simulation mit dem neuen korrelierten Modell (gelbe Linien) die Messung (Symbole) gut nachbildet, während das Vernachlässigen der Korrelation (blaue Linien) mit steigender Frequenz zu deutlichen Fehlern führt. Die Ergebnisse, die in Abb. 2 gezeigt werden, wurden mit dem am FBH kürzlich vorgestellten Großsignal-Rauschmodell erzielt. Die dem Modell zugrunde liegende Annahme ist, dass es möglich ist, das HBT-Rauschen mit zwei unkorrelierten Quellen nachzubilden, wenn diese richtig platziert sind, wie in Abb. 3 gezeigt. Diese Konfiguration ähnelt dem Ersatzschaltbild, das bereits von van der Ziel vorgeschlagen wurde mit dem entscheidenden Unterschied, dass im Großsignal-Modell des FBH nur eine der Zeitkonstanten die Korrelation des Rauschens beeinflusst. Nur ein Teil der Kollektor-Laufzeit ist in der Korrelation des Schrotrauschens sichtbar.

Fig. 2 shows the minimum noise figure NF_{min} of a $3 \times 30 \mu m^2$ HBT in two bias points. The impact of the correlation is clearly observed, since the curves obtained with the correlated model (yellow lines) closely follow the measured data (bullets), while neglecting this correlation renders the result highly inaccurate as frequency increases (blue lines).

The results shown in fig. 2 were obtained from the recently proposed large-signal shot noise model. The basic assumption of this new approach is that it is possible to approximate the noise performance with two non-correlated noise sources. These sources need to be properly placed, as shown in fig. 3. The basic configuration resembles the small-signal model introduced by van der Ziel with the important difference that in this large-signal model only one time constant impacts the noise correlation. This means only a part of the collector time-delay is visible in the correlation of the noise sources.

Abb. 4 zeigt ein Beispiel für die unterschiedlichen Zeitkonstanten eines HBT. Die schwarze Linie entspricht der gesamten Laufzeit des Kleinsignal-Modells, extrahiert aus S-Parametern. Die Symbole geben die Zeitkonstante an, die die Korrelation des Schrotrauschens dominiert. In HBTs dominiert die Kollektor-Laufzeit (blaue Linie) im Bereich mittlerer Stromdichten. Die Korrelations-Zeitkonstante entspricht offenbar 65% der Kollektor-Laufzeit (gelbe Linie). Auf dieser Eigenschaft basiert das neue Modell, in dem unterschiedliche Teile der Transitzeiten durch verschiedene Ladungen modelliert werden.

Der Vorteil dieses Modells liegt darin, dass es nur zwei unkorrelierte Quellen benötigt, deren Schrotrauschen von den Gleichströmen kontrolliert wird. Der signifikante Gewinn an Genauigkeit des Rauschmodells wird also erzielt ohne die Komplexität des Großsignal-Modells zu erhöhen.

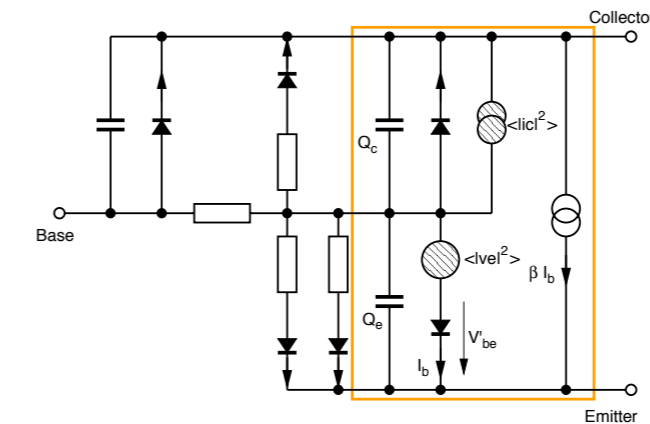


Abb. 3: Großsignal-Rauschmodell für HBTs mit zugehörigen Schrotrauschquellen
Fig. 3: Intrinsic large-signal HBT model with shot noise sources

Fig. 4 gives an idea of the time constants of a HBT. The black line shows the total transit time of the small-signal model as extracted from S parameters. The bullets represent the correlation time constants determined from noise measurement. It can be seen that the collector transit time model (blue line) dominates the transit times at moderate currents. It is also shown that 65% of this time constant (yellow) yields a good fit of the noise correlation. This property is exploited in the new noise model by modeling the different parts of the transit time through the different charges of the model.

It is the benefit of this model that it relies only on two non-correlated noise sources, which contribute white noise according to the DC currents. Thus, the significant enhancement in model accuracy is achieved at no additional cost in terms of model complexity.

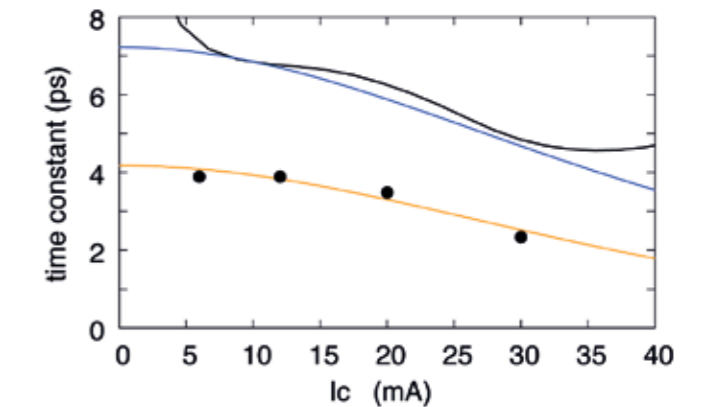


Abb. 4: Zeitkonstanten eines $3 \times 30 \mu m^2$ HBT mit $V_{ce} = 4V$. Schwarze Linie: Gesamt-Laufzeit des Kleinsignal-Modells; Punkte: Zeitkonstante für Korrelation des Schrotrauschens; blaue Linie: Kollektor-Laufzeit des FBH Großsignal-Modells; gelbe Linie: 65% der modellierten Kollektorlaufzeit.
Fig. 4: Time constants of a $3 \times 30 \mu m^2$ HBT at $V_{ce} = 4V$. Black line: total transit time of the small-signal model; bullets: noise correlation time-constant; blue line: collector transit time predicted by FBH large-signal model; yellow line: 65% of modeled collector transit time.

Veröffentlichungen // Publications

A. Wentzel, C. Meliani, J. Flucke, W. Heinrich, "High-Frequency Time-Domain Measurement Technique for Class-S Amplifiers", in: Dig. German Microwave Conf (GeMIC) 4A-1. Accepted 2007, published 2008.

M. Rudolph, F. Korndörfer, P. Heymann, W. Heinrich, "Compact Large-Signal Shot-Noise Model for HBTs", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 56, 7 –14, Accepted 2007, published 2008.

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

Mikrowellenkomponenten und -systeme
Microwave Components and Systems

GaN-Elektronik
GaN Electronics

Diodenlaser
Diode Lasers

GaN-Optoelektronik
GaN Optoelectronics

Materialien und Prozesse
Materials and Processes

Netzwerke
Networks



Der Geschäftsbereich GaN-Elektronik entwickelt und fertigt GaN-basierte Mikrowellen-Leistungsbau-elemente 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 Lebensdauermessungen und der Analyse von potenziellen Ausfallmechanismen. Der Entwurf von Mikrowellschaltungen sowie die Simulation von gehäusten Transistoren erfolgt in enger Abstimmung mit dem Geschäftsbereich Mikrowellenkomponenten und -systeme.

Folgende Mikrowellen-Leistungsbau-elemente 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-Bau-elemente 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
- Aufbau- und Verbindungstechniken für die genannten Hochleistungstransistoren

Im Bereich GaN-Elektronik gewinnen Zuverlässigkeitsmessungen in Verbindung mit der Analyse und Interpretation möglicher Degradationsmechanismen zunehmend an Bedeutung. Ziel ist es, diese Ergebnisse unmittelbar in den Bauelementprozess einfließen zu lassen, um somit eine kontinuierliche Verbesserung der GaN-Prozesse zu erreichen. Die Zu-

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
- Mounting and interconnection techniques suitable for these power applications

Within the Business Area GaN Electronics reliability characterizations combined with analyses and understanding of possible degradation mechanism are of ever increasing importance. The goal is to feed back these results into technological development cycles in order to obtain continuous 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.

verlässigkeitsmessverfahren 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.

■ Hochspannungs-GaN-HEMTs für effiziente Schaltungen

Ideale Schalttransistoren zeigen einen sehr niedrigen Einschaltwiderstand kombiniert mit einer hohen Spannungsfestigkeit – Eigenschaften, die mit GaN-Transistoren erreicht werden können. So ist für eine gegebene Durchbruchspannung der Einschaltwiderstand von GaN-HEMTs mindestens eine Größenordnung kleiner als bei Silizium-Transistoren. Damit übertreffen GaN-Transistoren ihre Konkurrenten auf Silizium-Basis in der Leistungselektronik und eröffnen einer GaN-basierten Leistungselektronik vielversprechende Zukunftsperspektiven.

Die Basis der hohen Leistungsdichte der AlGaIn/GaN-HEMTs sind die materialspezifischen Parameter wie hohe Elektronendichte, hohe Elektronenbeweglichkeit und eine hohe Durchbruchfeldstärke. Noch liegt die maximale Betriebsspannung dieser Transistoren unterhalb des theoretischen Limits des GaN-Materialsystems. Um die Leistungsfähigkeit weiter an das theoretisch Mögliche heranzuführen, müssen die Feldverteilung und die möglichen Stromflusspfade in dem Bauelement besser verstanden werden. Dazu werden zwei Ansätze geprüft. Ein geschicktes Design der Halbleiterschichten hilft, die Elektronen auch bei hohen Spannungen in dem Transistorkanal zu halten. Die Implementierung von Feldplatten minimiert nicht nur Feldspitzen im Bauelement, sondern unterdrückt auch Leckströme, die oft als Initiator des Hochspannungsdurchbruchs wirken.

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 to the market.

■ High-Voltage GaN HEMTs for Efficient Switching Applications

Ideal switching devices are characterized by an extremely low turn-on resistance combined with high-voltage capability at off-state conditions. GaN transistors meet these requirements in an ideal way. In this respect, GaN can reach better properties than its major competitor in power electronics, the silicon. Theoretically at least a one order of magnitude improvement of the on-state resistance is possible at a given breakdown voltage. This opens a large potential for future GaN-based power devices.

The material-related properties of AlGaIn/GaN HEMTs such as the high electron density and mobility, giving high current density, and high breakdown strength are the basis for the superior power densities in these devices. However, the maximum operation voltage of these transistors still stays behind the theoretical limits of the material systems. The field distribution as well as possible current paths in the transistor have to be well understood and controlled to shift the transistor performance closer to its theoretical limit. Here, FBH shows that a smart design of the semiconductor layers helps to keep the electrons inside the transistor channel and that the introduction of field plates not only reduces critical field-strength peaks but additionally suppresses leakage currents that may lead to a premature transistor breakdown.

Unterdrückung des Bufferschicht-Durchbruchs

Eine negative Gatespannung ist nötig, um einen GaN-HEMT zu sperren. Dennoch fließt bei einer ausreichend hohen Drainspannung ein Leckstrom von Source zu Drain. Mittels Computersimulationen konnte dieser unerwünschte Strom auf Elektronen zurückgeführt werden, die den Transistorkanal verlassen und in dem darunterliegenden GaN-Buffer die Raumladungszone des Gates umgehen (Abb. 1).

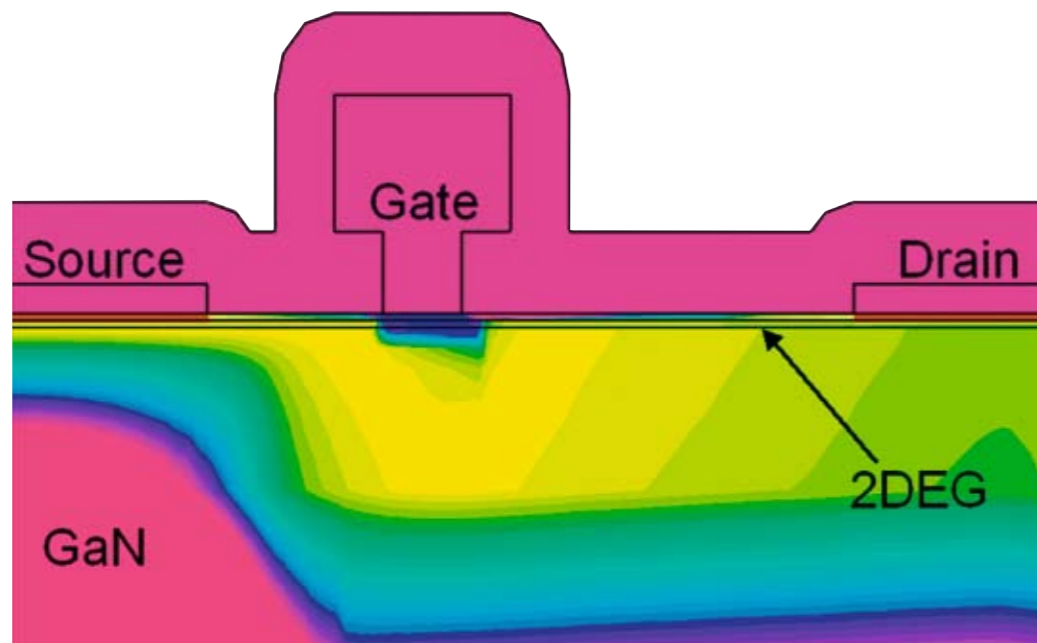


Abb. 1: Simulierte Elektronenverteilung eines AlGaIn/GaN-HEMTs im ausgeschalteten Zustand. $V_{DS} = 100$ V und $V_{GS} = -6$ V. Der Kanal unter dem Gate ist sauber abgeschnürt (blau). Elektronen dringen jedoch in den GaN-Buffer ein (gelb) und driften so von Source zu Drain.

Fig. 1: Simulated electron distribution of an AlGaIn/GaN HEMT in the off-state. $V_{DS} = 100$ V and $V_{GS} = -6$ V. The channel below the gate is well pinched (blue region). Electrons penetrate deep into the GaN buffer (yellow) and find their way from source to drain.

Die Betriebsspannung der Transistoren könnte erhöht werden, wenn dieser Buffer-Durchbruch unterbunden wird. Eine ausreichend hohe Leitungsbandbarriere zwischen dem zweidimensionalen Elektronengas (2DEG) und dem Buffer kann ein Ausbrechen der Elektronen aus dem Transistorkanal verhindern. Allerdings nimmt die Leitungsbandenergie in einem normalen AlGaIn/GaN-HEMT vom 2DEG aus in die GaN-Bufferregion nur langsam zu (Abb. 2).

Avoiding buffer punch-through

A HEMT is in the off-state when sufficient negative gate bias is applied. However, at sufficient high drain bias, leakage currents still flow from source to drain. Computer simulations revealed this current as electrons leaving the transistor channel and bypassing the depletion zone of the gate through the bulk of the GaN buffer, see fig. 1.

By preventing such a buffer punch-through the safe drain operation voltage could be further increased. A sufficient high-energy barrier for the electrons between the two-dimensional electron gas (2DEG) and the buffer would confine the electrons to the channel and prevent an electron injection into the buffer, even at high drain voltages. For the standard AlGaIn/GaN HEMT, the conduction band energy slowly increases from the 2DEG to deeper GaN buffer regions, see fig. 2.

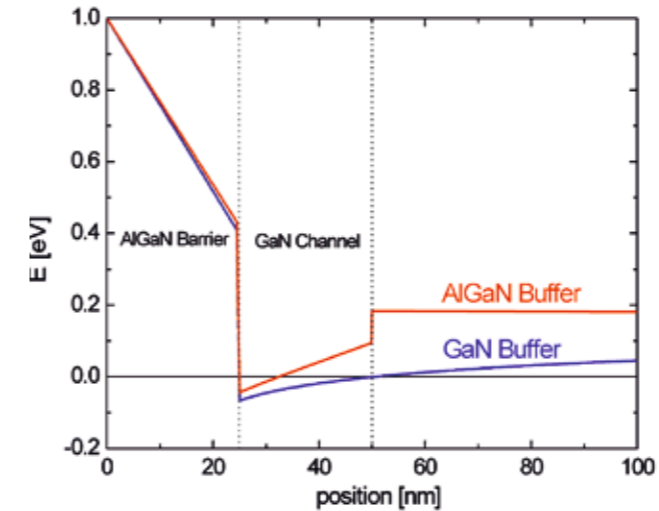


Abb. 2: Leitungsbandenergie eines HEMTs mit normalem Epitaxiaufbau (blau) und mit AlGaIn-Buffer und GaN-Kanal (rot, 5% Al im AlGaIn-Buffer). Die AlGaIn-Barriere enthält 25% Al.

Fig. 2: Conduction band energy of a HEMT with standard epitaxial design (blue, AlGaIn barrier and GaN buffer) and with AlGaIn buffer and GaN channel (red, 5% Al in AlGaIn buffer). There is 25% Al in the AlGaIn barrier for both cases.

Wird der GaN-Halbleiter des Buffers durch AlGaIn mit einer moderaten Al-Konzentration ersetzt, steigt die Leitungsbandenergie des Buffers stark an und eine wirkliche energetische Barriere am unteren Ende des Transistorkanals bildet sich aus (Abb. 2). Die Elektronen sind somit besser im Transistorkanal eingeschlossen und der Bufferleckstrom kann deutlich reduziert werden (vergleiche Abb. 3 mit Abb. 1).

Replacing the GaN buffer by an AlGaIn buffer with a moderate Al concentration would increase the conduction band energy of the buffer and give an energy barrier to the transistor channel, made of GaN. The electrons are better confined in the transistor channel and the buffer punch-through can get significantly reduced, compare fig. 3 with fig. 1.

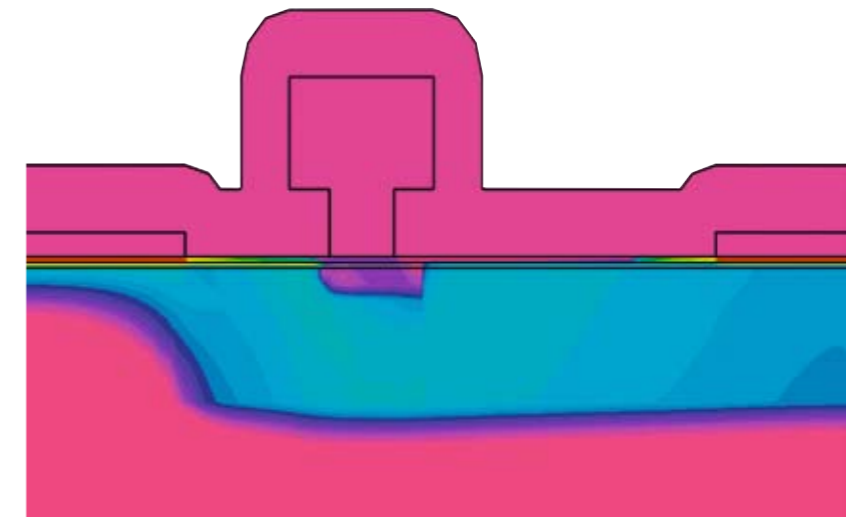
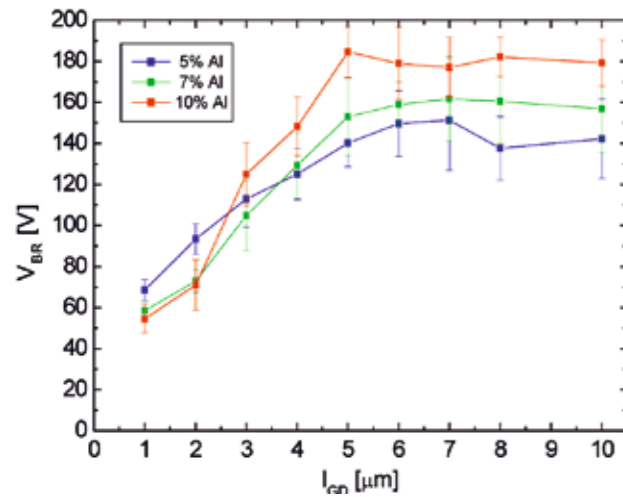


Abb. 3: Simulierte Elektronenverteilung eines AlGaIn-Buffer-HEMTs im ausgeschalteten Zustand. $V_{DS} = 100$ V und $V_{GS} = -6$ V. 5% Al im AlGaIn-Buffer, der GaN-Kanal ist 24 nm dick. Die Elektronenkonzentration im Buffer ist gegenüber dem GaN-Buffer-HEMT (Abb. 1) deutlich reduziert. Selbe Farbskala wie in Abb. 1.

Fig. 3: Simulated electron distribution of an AlGaIn buffer HEMT in the off-state. $V_{DS} = 100$ V and $V_{GS} = -6$ V. 5% Al in AlGaIn buffer. GaN channel is 25 nm thick. The electron concentration in the buffer is significantly reduced compared to the GaN buffer. Same scales and colors as in fig. 1.

Wafer mit einem AlGaIn-Buffer-Design wurden mittels MOCVD gewachsen und Transistorstrukturen auf ihnen prozessiert. Diese Transistoren zeigen mit steigender Al-Konzentration im Buffer eine zunehmende Hochspannungsfestigkeit (Abb. 4). Die Durchbruchspannung sollte für einen Transistor mit gut eingeschlossenem Transistorkanal mit zunehmendem Gate-Drain-Abstand anwachsen. Abb. 4 zeigt, dass diese Skalierung am deutlichsten für die höchste Al-Konzentration im Buffer auftritt.



Wafers with the AlGaIn buffer epitaxial design have been grown and transistors were processed. The transistors showed an increasing breakdown voltage with increasing Al content in the AlGaIn buffer, see fig. 4. The breakdown voltage should scale with the gate-drain distance in a transistor with a well-confined electron channel. The scaling is most pronounced for the highest Al content in the AlGaIn buffer (fig. 4).

Abb. 4: Skalierung der Durchbruchspannung mit dem Gate-Drain-Abstand für HEMTs mit 5% (blau), 7,5% (grün) und 10% (rot) Al-Anteil im AlGaIn-Buffer
 Fig. 4: Scaling-up of the break-down voltage with the gate-drain distance for HEMTs for AlGaIn buffers with 5% (blue), 7.5% (green) and 10% Al (red) content

Gitter-Feldplatten

Alternativ kann der Drain-Leckstrom auch durch eine Ausweitung der Gate-Raumladungszone unterdrückt werden. Dies konnte mit Computersimulationen für Source- und Gate-verbundene Feldplatten und für lange Gates gezeigt werden. Gitter-Feldplatten (MGFP) sind ein neuer erweiterter Ansatz um die Durchbruchspannung mit mehreren zusätzlichen Raumladungszonen zu erhöhen. Abb. 5 zeigt die grundlegende Struktur der MGFP, dabei kann jeder einzelne Finger an unterschiedliche Potentiale (Gate, Source, Drain, potenzialfrei) angeschlossen werden.

Ihr Wirkungsprinzip beruht darauf, dass sich an jedem Finger ein Feldstärkenmaximum einstellt. Mit zunehmender Drainspannung induzieren dann die Gatefinger analog zu einem MOS-Gate ein elektrisches Feld. Dieses Feld wirkt durch den Transistorkanal hindurch und erschwert es den Elektronen des Kanals einen kurzen Leckpfad um das eigentlich Gate herum durch den Buffer aufzubauen. Zusätzlich ist der

Multiple-grating field-plates

Improvement of the channel depletion for sub-threshold gate voltages is another way to reduce the drain-leakage current and to postpone device breakdown. Channel depletion improvement was demonstrated in simulations using field plates and longer gate structures. Multiple-grating field-plates (MGFP) are an innovative approach to improve the breakdown voltage by channel depletion. Fig. 5 shows the generic structure concept of the MGFP. In principle each of the MGFP fingers could be connected to a different potential such as gate, source, drain, floating, ground or external controllable potential source.

The basic operation principle of the MGFP structure is that each of the fingers accumulates an electric field peak. With increasing drain voltage the gate fingers induce a field to the channel acting similar to a MOS gate and deplete the channel from carriers. These additional depletion zones reduce the drain-leakage. In fact, they act as positive feedback – the higher the

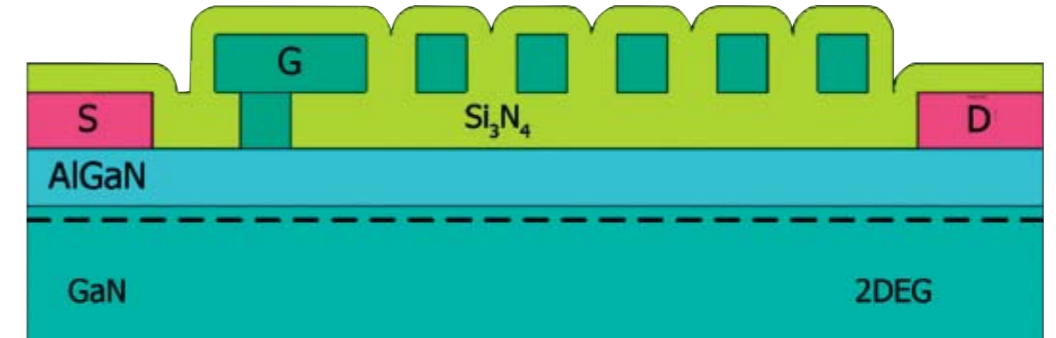


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau eines AlGaIn/GaN-HEMTs mit Gitter-Feldplatten
 Fig. 5: Principal geometry of multiple-grating field-plates on a AlGaIn/GaN HEMT

Spannungsabfall zwischen Gate und Drain gleichmäßiger verteilt. Beide Effekte führen zu einer höheren Durchbruchspannung. Abb. 6 zeigt die simulierte Verteilung der Elektronenkonzentration einer HEMT-Struktur mit zwei Gate-verbundenen Feldplattenfingern mit $V_{GS} = -6$ V und einer Drainspannung von 200 V. Sowohl unter dem Gate als auch unter den MGFP-Fingern ist der Transistorkanal leergeräumt. Darüber hinaus ist die Raumladungszone unter den Feldplattenfingern so groß, dass die Elektronen bis tief in den Buffer verdrängt werden.

Das beschriebene Leckstromverhalten ist in Abb. 7 dargestellt. Das Gatepotenzial verhindert bei niedrigen Drainspannungen (< 30 V in Abb. 7) den Drain-Leckstrom. Bei steigender Drainspannung beginnt der Buffer-Durchbruch mit einem schnell ansteigenden Leckstrom. Die MGFP ist ohne Effekt, da die Elektronenkonzentration im Kanal unter den Fingern noch hoch ist. Ist die Drainspannung ausreichend hoch

drain voltage, the higher the induced field beneath the fingers, the more depleted is the channel. Therefore the voltage drop between gate and drain is more equally distributed leading to higher breakdown voltage. Fig. 6 shows the electron-concentration distribution of a simulation example for a device with two additional gate fingers biased at $V_{GS} = -6$ V and a high drain voltage $V_{DS} = 200$ V. The simulation shows that the AlGaIn barrier layer as well as the channel under the MGFP are depleted. Furthermore, the induced field under the drain-side gate finger is so large that it suppresses the electrons deep into the buffer causing a secondary punch-through.

The described situation is displayed in the reduced drain-leakage current for the case of the field plates, see fig. 7. At low voltages (< 30 V in fig. 7), the gate bias prevents any current flow. At higher drain bias, the punch-through starts, giving rise to a fast increasing leakage current. First, the MGFP shows no effect

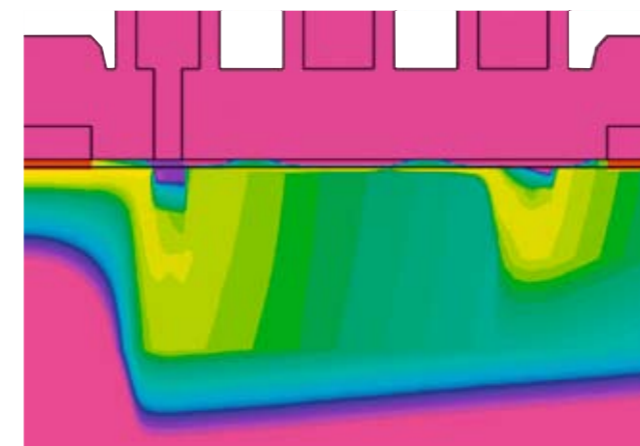
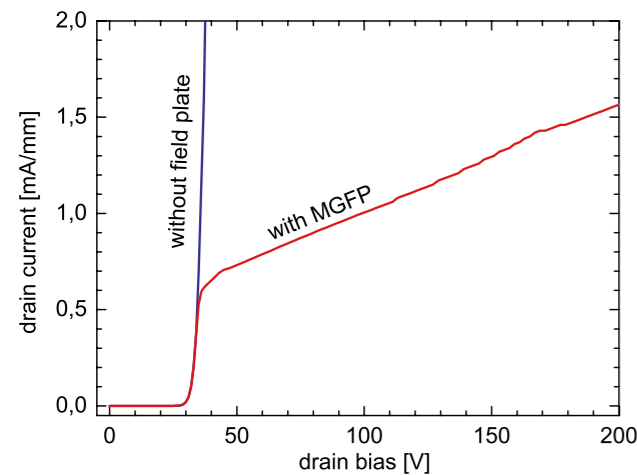


Abb. 6: Simulierte Elektronenverteilung eines HEMTs mit Gitter-Feldplattenstruktur. $V_{DS} = 200$ V, $V_{GS} = -5,25$ V. Man beachte die Modulation der Elektronenkonzentration im Transistorkanal.
 Fig. 6: Simulated electron concentration for a multiple-grating field-plate structure. $V_{DS} = 200$ V, $V_{GS} = -5.25$ V. Note the modulation of the electron concentration in the 2DEG.

(> 40 V in Abb. 7), verringert sich die Elektronenkonzentration im Kanal soweit, dass der Kanal unter den Feldplatten-Fingern geleert ist und der Buffer-Durchbruch unterdrückt wird. Abb. 7 zeigt, dass die MGFPs die Betriebsspannung von 40 V auf über 100 V anheben können.



since the channel between gate and drain still has a high electron concentration. The field of the MGFP fingers is insufficient to significantly close the channel. At sufficient high drain bias (> 40 V in fig. 7), the electron concentration in the channel between gate and drain is that much reduced, that the field of the MGFP fingers can completely deplete the channel beneath the single fingers. The MGFP get effective and, compared to the structure without field plates, significantly reduce the drain-leakage current. Fig. 7 shows that MGFPs can increase the maximum operation voltage of a HEMT from 40 V to more than 100 V.

Abb. 7: Simulierter Drain-Leckstrom für einen normalen HEMT und einen HEMT einer zweifingrigen Gitter-Feldplatte (MGFP).
Fig. 7: Simulated drain-leakage current, comparing a MGFP configuration to a standard device without field plates. The MGFP has two gate-connected fingers.

Zusammenfassung

Dem Spannungsdurchbruch der Transistorstrukturen geht ein Source-Drain-Leckstrom voraus. Simulationen zeigen, dass dieser Leckstrom seine Ursache im Buffer-Durchbruch hat. Zwei Methoden zur Reduzierung dieses Leckstroms wurden vorgestellt. Mit dem AlGaN-Buffer wird die Eingrenzung des Elektronenkanals verbessert. Die einzelnen Finger der Gitter-Feldplatten können den Elektronenkanal zwischen Source und Drain zusätzlich zum Gate leeren und so das Umgehen der Gate-Raumladungszone durch den Buffer erschweren. Beide Methoden setzen an unterschiedlichen Ursachen des Leckstroms an und können daher in einem Bauelement konstruktiv kombiniert werden.

Veröffentlichungen // Publications

E. Bahat-Treidel, V. Sidorov, J. Würfl, G. Tränkle, "Simulation of AlGaN/GaN HEMT's breakdown voltage enhancement using grating field plates", SISPAD 2007.

Conclusions

FBH realized that device breakdown starts with sub-threshold drain-leakage. Simulations showed that the nature of this drain-leakage is a buffer punch-through. Two methods to reduce the drain-leakage have been presented in simulations and in experimental results. With an AlGaN buffer, the electron confinement to the channel gets increased and the buffer punch-through is suppressed. The fingers of a multiple-grating field-plate can pinch the transistor channel between gate and drain. Electrons that managed to bypass the gate region by gate punch-through then get blocked. One should note that both methods are complementary and can be combined in one device.

Zuverlässigkeits-Screening an GaN-HEMTs

Schnelle Spannungsfestigkeitstests liefern ein Maß für die Qualität und Reproduzierbarkeit eines fertig prozessierten Durchlaufs. Diese Methode kann Degradationseffekte schnell bestimmen, die mit der Epitaxie oder mit dem Prozess zusammenhängen.

GaN-HEMTs sind sehr vielversprechend für HF-Leistungsanwendungen und Schalttransistoren für hohe Betriebsspannungen. Die Zuverlässigkeit muss jedoch noch nachgewiesen werden. Die bisher identifizierten Ausfallmechanismen basieren auf der Degradation von Drain-Strom I_{DS} , Gate-Leckstrom I_G , Pinch-off-Spannung V_p , Ausgangsleistung P_{out} und dem Anstieg des Einsatzwiderstandes R_{on} .

Ein schneller on-wafer Spannungsfestigkeitstest für die Bauelemente wurde entwickelt, indem DC-Stufen-Tests durchgeführt wurden (Abb. 1). Dabei wird die Drain-Spannung alle 2 Stunden um 5 V im pinch-off-Zustand ($V_G = V_p - 2 V$) erhöht. Diese Methode nutzt

Fast Robustness Tests for GaN HEMTs Reliability Screening

Fast robustness tests provide a measure to prove quality and reproducibility of an as finished process run. The method can determine fast degradation effects which might be associated to epitaxial or processing issues.

GaN HEMTs exhibit extraordinary performance for high voltage switching and RF-power applications but still lack solid reliability. Failure modes identified so far are based on degradations of drain current I_{DS} , gate leakage current I_G , pinch-off V_p , output power P_{out} and increase of the on-state resistance R_{on} . Degradation of gate leakage current I_G has been investigated by applying on-wafer DC-step-stress test for a short-time test (one day to a couple of days).

A fast on-wafer device robustness screening method has been developed by performing DC-step-stress tests of GaN HEMTs (see fig. 1). The tests consist of a step ramping of drain-source voltage V_{DS} by

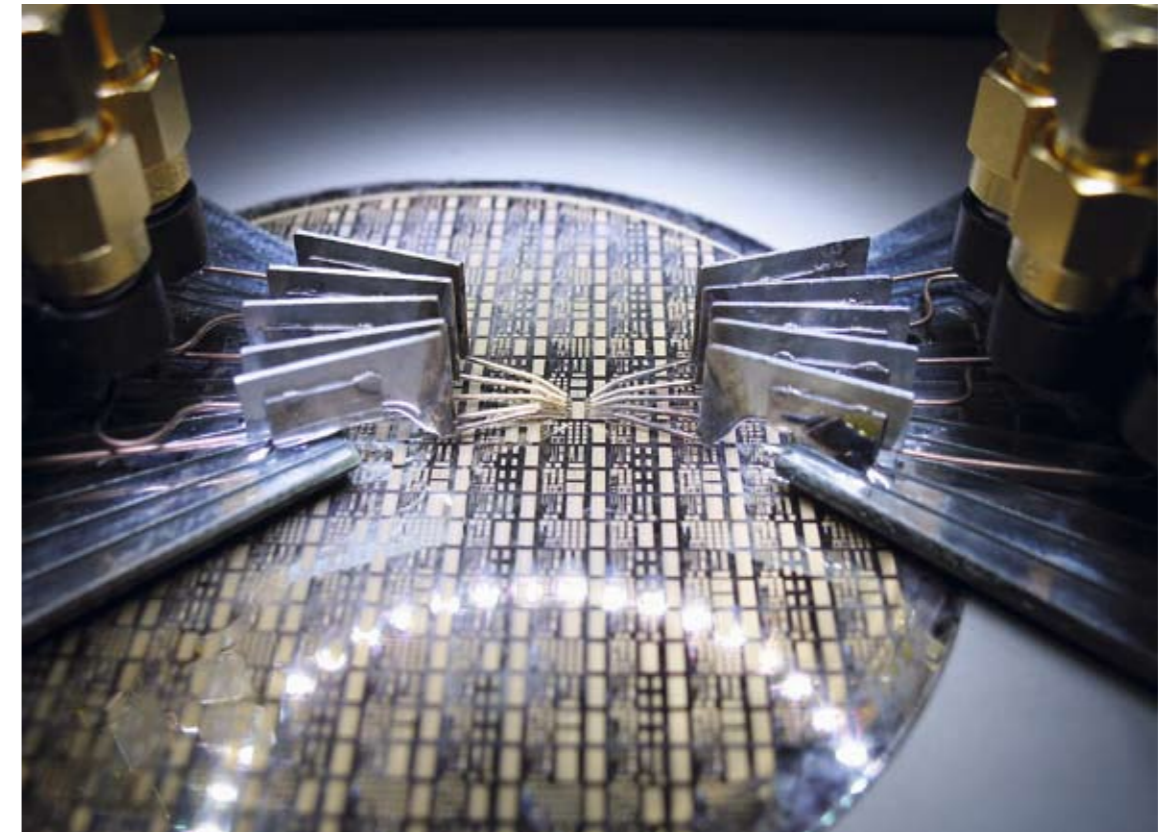
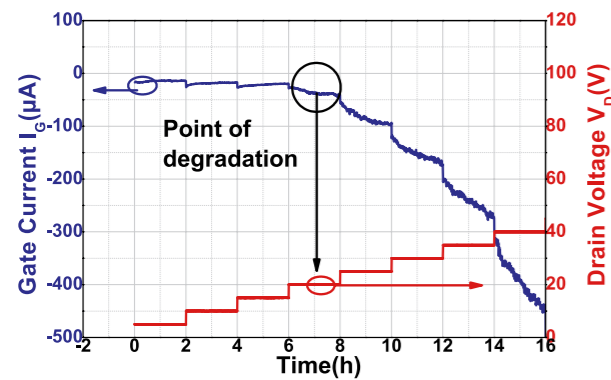


Abb. 1: Messaufbau für on-wafer Spannungsfestigkeitstest. Es werden gleichzeitig fünf Transistoren mit einer koplanaren Mehrfach-Testspitze gemessen.
Fig. 1: On-wafer step-stress measurement set-up. 5 transistors are stressed simultaneously using a coplanar multi-probing arrangement.

den irreversiblen Anstieg des Gate-Leckstroms zur Bestimmung der kritischen Spannung für die Degradation des Bauelements. Damit kann kurzfristig eine Aussage über die Robustheit der Bauelemente getroffen werden.

Abb. 2 stellt die Entwicklung des Gate-Leckstroms während eines DC-Stufen-Tests dar. Zu Beginn der Testprozedur steigt der Leckstrom bei jeder Drain-Spannungsstufe. Während der Verweilzeit auf einem bestimmten Potenzial reduziert sich der Leckstrom. Dieses Verhalten könnte mit der Existenz langsamer Störstellen erklärt werden, die mit steigender Spannung immer mehr besetzt werden. Es existiert jedoch eine Grenzspannung, ab der keine Verringerung des Gate-Leckstroms mehr beobachtet wird – der Gate-Leckstrom steigt irreversibel – das Bauelement beginnt zu degradieren. In Abb. 2 ist der Einsatz des irreversiblen Anstiegs des Gate-Leckstroms durch einen Pfeil markiert, welcher als Schwelle für den Beginn der Degradation betrachtet wird.



5 V every two hours at pinched channel conditions ($V_G = V_p - 2$ V). The method uses irreversible leakage current increase as an indicator to determine the critical voltage for device degradation in dependence on epitaxial layer designs for example.

Fig. 2 represents the evolution of a typical gate leakage current during step-stress test. At the beginning of the test procedure leakage current first increases with every drain voltage step followed by a recovery of the gate leakage. This behavior might be attributed to the presence of slow traps that are increasingly charged after each drain voltage step. However, a threshold drain voltage exists beyond which recovery of the gate leakage is not present anymore, instead leakage current increases irreversibly – the device starts to degrade. In fig. 2 this onset of irreversible gate leakage degradation is marked by an arrow. This is considered as the threshold of a beginning degradation.

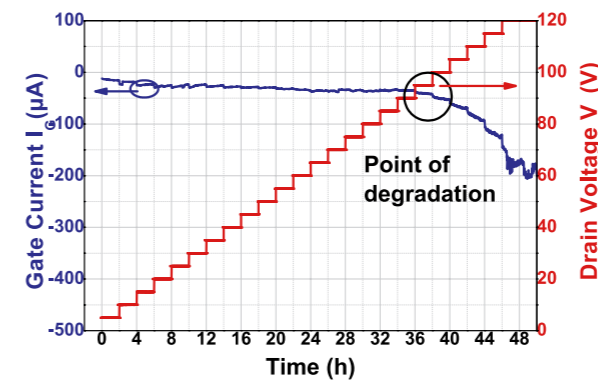
Abb. 2: Typischer DC-Stufen-Test über der Zeit gemessen an Bauelementen mit einem Standard Epitaxie-Aufbau der AlGaIn-BARRIERE (25% Al, 25 nm Dicke). Die Grenzspannung für den Beginn der irreversiblen Degradation liegt bei 20 V.
Fig. 2: Typical DC-step-stress graph over time of devices with standard epitaxial design of the AlGaIn barrier (25% Al content, 25 nm thickness). The threshold voltage for the onset of irreversible degradation effects is 20 V in this case.

Typische DC-Stufen-Tests von Bauelementen mit Epitaxieschichten mit einer Al-Konzentration von 25% in der AlGaIn-BARRIERESCHICHT beginnen ab einer Spannung von 25 V zu degradieren. Der irreversiblen Anstieg des Gate-Leckstroms ist stets mit einer Reduktion der Mikrowellenleistung verbunden, da sich gleichzeitig die Kniespannung erhöht und die Dispersion zunimmt. Die kritische Spannung ist abhängig vom Schichtaufbau der Transistorstrukturen. Beispielsweise liegt die Grenzspannung für die Degradation des Gate-Leckstroms bei Bauelementen mit niedrigem Al-Gehalt in der Barriere (18% gegenüber 25%) mit Werten von 60 - 95 V deutlich höher (Abb. 3).

Typical DC-step-stress tests from devices with epitaxial designs having an Al concentration of 25% in the AlGaIn barrier start to degrade at around 20 V. The onset of leakage current is mostly associated with a reduction of microwave power due to knee walk-out which is mostly observed in conjunction with an increasing gate leakage. The situation is different if devices are built up on epitaxial layers having a lower Al concentration in the Al barrier, for example 18%. In this case the threshold voltage for gate leakage current degradation increases to V_{DS} values of 60 - 95 V (see fig. 3).

Der Einfluss der lokalen Relaxation in der AlGaIn-BARRIERE an Orten mit hoher elektrischer Feldstärke könnte dieses Verhalten erklären. Aufgrund des inversen piezoelektrischen Effekts wird in Gebieten mit hohem elektrischen Feld die bereits tensil verspannte Schicht stärker verspannt. Dadurch steigt lokal die Verspannung über die Grenze der Relaxation. Es wird vermutet, dass der beobachtete Anstieg des Gate-Leckstroms mit einem Transport von Elektronen über Defekte zu erklären ist. Epi-Designs mit geringerer Al-Konzentration in der Barriere produzieren eine geringere mechanische Verspannung in der AlGaIn-Schicht. Daher sind diese Epi-Designs weniger anfällig für weitere Verspannung durch den inversen piezoelektrischen Effekt. Folglich haben sie höhere Grenzspannungen für die Degradation.

Epi-Designs mit einer GaN-Cap-Schicht zeigen ebenfalls eine höhere Grenzspannung. Verantwortlich hierfür ist das durch die Cap verringerte elektrische Feld in der AlGaIn-BARRIERE an der Drainseite des Gates. Daher verschiebt sich die lokale Relaxation zu höheren Spannungen.



Localized relaxation effects of the AlGaIn barrier in high field regions of the device might explain this behavior. Due to the inverse piezoelectric effect, additional tensile strain adds to the existing tensile strain in high field areas of the device and might thus locally exceed the threshold for relaxation. The observed increase of gate leakage is believed to be due to defect assisted conductivity mechanisms. Epitaxial designs with lower Al concentration in the barrier produce a lower degree of mechanical strain in the AlGaIn layer. Therefore, these designs are less sensitive to additional tensile strains built up due to the inverse piezoelectric effect. They consequently show higher threshold values for degradation. Epitaxial designs with GaN cap show reduced electrical fields at the drain side edge of the gate and may therefore postpone potential local relaxation effects.

Abb. 3: DC-Stufen-Test über der Zeit gemessen an Bauelementen mit reduzierter Al-Konzentration in der AlGaIn-BARRIERE. Die Grenzspannung für irreversible Degradation erhöht sich auf 25 V.
Fig. 3: DC-step-stress graph versus time of devices with Al concentration in the AlGaIn barrier reduced to 18%. The threshold voltage for the onset of irreversible degradation now increases to 95 V.

Selbstsperrende GaN-Transistoren mit tiefergesetztem Gate

AlGa_x/Ga_{1-x}N-HEMTs eignen sich wegen ihres niedrigen Einschaltwiderstands und ihrer Hochspannungsfestigkeit besonders als Schalttransistoren in Leistungsteilen. In diesen Anwendungen – insbesondere in der Raumfahrt – muss aus Sicherheitsgründen der Transistor vollständig ausgeschaltet sein, wenn die Kontrollelektrode spannungslos ist. Man spricht von einem selbstsperrenden Transistor. Allerdings sind gewöhnliche AlGa_x/Ga_{1-x}N-HEMTs mit null Volt Gatespannung immer im eingeschalteten Zustand und eine negative Gatespannung ist nötig um sie auszuschalten (selbstleitender Transistor). Ohne Gatespannung formt das zweidimensionale Elektronengas (2DEG) eine leitende Verbindung zwischen Source und Drain (Abb. 1a). Eine ausreichend negative Gatespannung (Schwellspannung) ist nötig um das 2DEG unter dem Gate zu verdrängen.

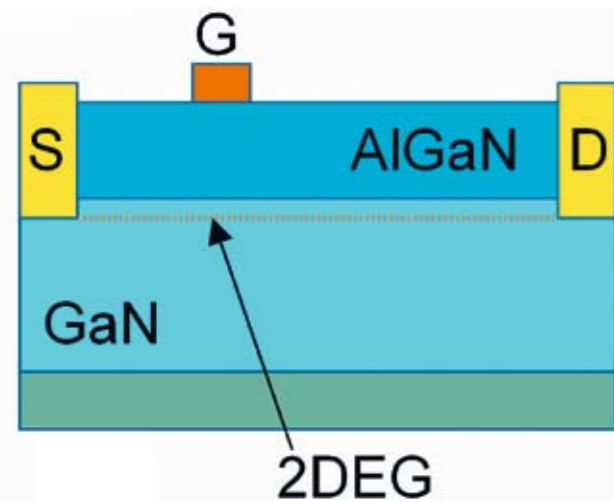


Abb. 1a: Schema eines selbstleitenden AlGa_x/Ga_{1-x}N-HEMTs. Das 2DEG verbindet Source und Drain.

Fig. 1a: Normally-on AlGa_x/Ga_{1-x}N HEMT scheme. The 2DEG electrically connects source and drain.

Um einen AlGa_x/Ga_{1-x}N-HEMT in einen selbstsperrenden Transistor zu transferieren, muss bereits das spannungslose Gate das 2DEG unterbrechen. Wird die Dicke der AlGa_x-Barriere verringert, so reduziert sich die Schwellspannung wegen des kürzeren Gate-2DEG-Abstands. Bei einer Restdicke des AlGa_x von 4 nm kann die Raumladungszone des Gates ohne anliegende Spannung die Elektronen des 2DEG vollständig verdrängen. Allerdings ist dann die Elektronendichte im 2DEG stark reduziert und der Ein-

Recessed Gates for GaN Normally-Off Transistors

AlGa_x/Ga_{1-x}N HEMTs have a great potential as switching transistors in power conditioning circuits due to their low on-state resistance and high breakdown strength. For safety reasons, especially in space applications one core condition is, that the power device is completely switched off when the control electrode is not biased. This requirement accounts for normally-off transistors. But standard AlGa_x/Ga_{1-x}N HEMTs with zero Volt gate bias are in the on-state and a negative gate bias is needed to switch them off (normally-on transistor). With no gate bias, the two-dimensional electron gas (2DEG) forms the conductive transistor channel between source and drain (see fig. 1a). To close the transistor, a sufficient negative gate bias, defined as threshold voltage, is needed to deplete the 2DEG electrons beneath the gate.

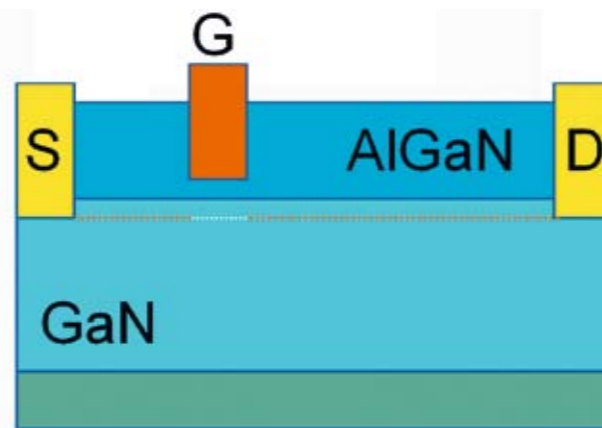


Abb. 1b: Schema eines selbstsperrenden AlGa_x/Ga_{1-x}N-HEMTs. Unter dem Gate ist das 2DEG unterbrochen.

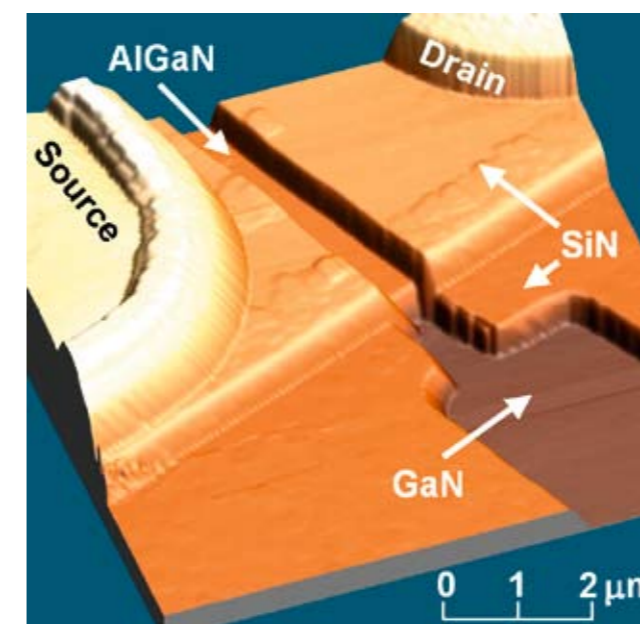
Fig. 1b: Normally-off AlGa_x/Ga_{1-x}N HEMT scheme. The 2DEG is interrupted beneath the gate.

To convert a AlGa_x/Ga_{1-x}N HEMT into a normally-off transistor, the unbiased gate has to interrupt the 2DEG, which is achieved by modifying its standard structure. Thinning the AlGa_x barrier reduces the threshold voltage by taking advantage of the reduced electron density in the 2DEG due to the shorter gate-2DEG distance. Full depletion at 0 V gate bias is reached for an AlGa_x thickness of approximately 4 nm. However, the on-state resistance of such a normally-off HEMT is significantly increased due to the

schaltwiderstand des Transistors wird hoch. Dies kann verhindert werden, wenn die Dicke der AlGa_x-Barriere nur unterhalb des Gates reduziert wird (Abb. 1b), man spricht von einem tiefergesetztem Gate oder Recess-Gate.

An der Gateposition wird die Dicke der AlGa_x-Schicht durch einen Trockenätzprozess von 24 nm auf 4 nm reduziert. Dieser Prozessschritt lässt sich problemlos in die Herstellungssequenz eines "Embedded Gates" einfügen. Beim Embedded-Gate-Prozess wird bereits vor der Gatemetallisierung die Transistorpassivierung aus einigen 100 nm SiN_x auf die AlGa_x-Schicht aufgebracht und diese dann an der Gateposition bis zur AlGa_x-Oberfläche trockenchemisch durchgeätzt. Die Ätzung wird in einem ICP-Reaktor mit SF₆ als Ätzgas unter einem niedrigem Plasmabias durchgeführt. Die dabei erzielte hohe Ätzselektivität zwischen SiN_x und AlGa_x mit einem Ratenunterschied ≥ 40 ermöglicht einen präzisen Ätzstopp auf der AlGa_x-Oberfläche.

Für das mit der selben Elektronenstrahl-Lithographiemaske erfolgende Recess-Ätzen wird Cl₂ oder SF₆ unter hohem Plasmabias eingesetzt. Chlor greift AlGa_x im Gegensatz zu SF₆ chemisch an. Das Abtragen des AlGa_x mit SF₆ beruht im Wesentlichen auf dem Sputtereffekt der in dem hohen Plasmafeld beschleunigten Ionen.



lower electron density in the 2DEG. This drawback can be avoided by thinning the AlGa_x only below the gate (gate recessing, see fig. 1b).

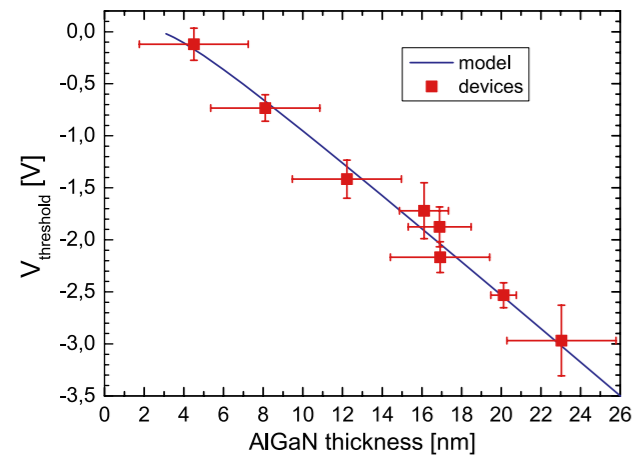
At the gate position the AlGa_x-layer thickness is reduced by dry etching from 24 nm thickness down to 4 nm. The implementation into the process sequence of the embedded gate technology is straight forward. Here, a several 100 nm thick silicon nitride passivation layer is deposited on the transistor surface before gate processing instead of passivating the transistor after gate metalization. The gate position is defined by electron-beam lithography and dry etching of the gate area is done by using PMMA electron-beam resist as etch mask. The passivation at the gate position is completely removed by etching with SF₆ in an ICP reactor under low-bias conditions. The high etch selectivity of SiN_x/AlGa_x ≥ 40 allows to precisely stop etching at the SiN_x/AlGa_x interface.

For recess processing of the AlGa_x barrier a different approach based on etching by chlorine or sputtering by fluorine species is used. Chlorine species chemically etch the AlGa_x while the fluorine based processes rely on the sputtering effect of the ions at higher plasma biases since AlGa_x will not chemically be etched by fluorine species.

Abb. 2: AFM-Aufnahme des sich zwischen Source und Drain befindlichen Gategrabens. Die Mesa-Kante kreuzt in mittlerer Höhe. Der Gategraben ist im aktiven Transistorgebiet 600 nm weit und erweitert sich auf 2 μ m außerhalb (untere Bildseite). Die AFM-Aufnahme wurde mit Prof. A. Richter an der TFH Wildau durchgeführt.

Fig. 2: AFM image of the etched gate trench located between the source contact and drain contact metal. The mesa edge runs across in the middle. The gate trench width is 600 nm in the active area and gets 2 μ m wide off the mesa (bottom of the picture). AFM measurement was done in cooperation with Prof. A. Richter, TFH Wildau.

Die Ätztiefe des Gategrabens wird über ein AFM-Profil bestimmt, siehe Abb. 2. Eine Analyse des Gategrabens mit optischen Methoden scheidet aus, da die Weite des Gategrabens (600 nm) in der selben Größenordnung wie die der optischen Wellenlängen liegt. Nach dem Ätzen des Gategrabens wird über eine zweite etwas weitere Elektronenlithographiemaske das Gate-Metall aufgedampft. Der Gategraben ist somit vollständig metallisiert und die überstehenden Metallränder auf dem SiN wirken als Gate-Feldplatte. Es wurden Transistoren mit unterschiedlicher Recess-Tiefe prozessiert. Die resultierenden Schwellspannungen sind in Abb. 3 dargestellt.



The etch depth of the gate trench was determined with AFM profiles (see fig. 2). Analyzing by optical metrology methods is not possible since the gate length (600 nm) is similar to the optical wavelengths. After recess etching, the gate metalization is done in a second electron-beam lithography step with a wider structure. Consequently, the gate trench is fully covered with the gate metal and the side parts of the metal gate stay on top of the passivation layer allowing to attach gate-connected field plates. Transistors with different recess depths have been processed and their resulting threshold voltage was determined (see fig. 3).

Abb. 3: Schwellspannung als Funktion der AlGaN-Dicke unterhalb des Gates. Die ursprüngliche AlGaN-Dicke war 24 nm.
Fig. 3: Threshold voltage for transistors with different AlGaN thickness below the gate. The initial AlGaN thickness was 24 nm.

Deutlich ist die Reduzierung der Schwellspannung mit abnehmender AlGaN-Dicke erkennbar. Selbstsperrendes Verhalten stellt sich bei einer Barrierendicke von 4 nm und weniger ein. Zusätzlich ist in Abb. 3 die auf einem halbklassischen elektrostatischen Modell beruhende Berechnung der Schwellspannung dargestellt. Diese theoretischen Berechnungen decken sich mit den Messwerten der Transistoren.

A clear correlation between the AlGaN thickness and the threshold voltage is shown. Normally-off behavior has been achieved for an AlGaN-barrier thickness of 4 nm. The estimated threshold voltage – based on a semi-classical electrostatic model – has been plotted in fig. 3 as well. Agreement between model and measurements has been obtained.

Abb. 4 zeigt die Transferkennlinie und Steilheit eines selbstleitenden Transistors mit 1 nm, eines selbstsperrenden Transistors mit 21 nm und eines dazwischenliegenden Falls mit 13 nm Ätztiefe. Die Schwellspannung verschiebt sich entsprechend der Tiefe des Gate-Recesses. Die maximale Steilheit steigt von 0,2 S/mm, für den selbstleitenden Fall auf 0,3 S/mm für den selbstsperrenden Transistor. Letzterer hat wegen der dünneren AlGaN-Barriere eine höhere Kapazität zwischen Gate und 2DEG. Die selbstsperrenden Transistoren erreichen etwa 60% der Stromtragfähigkeit der selbstleitenden HEMTs.

Fig. 4. shows the transfer characteristics for a normally-on transistor, a normally-off transistor and an intermediate case with 1 nm, 21 nm and 13 nm recess depth, respectively. The threshold voltage clearly shifts with the gate recess. The maximum transconductance increases from 0.2 S/mm for the normally-on to 0.3 S/mm for the normally-off devices. Due to the thinner AlGaN barrier this causes an increased capacitance between the gate and the 2DEG. With deeper gate recess, the maximum source drain current decreases. The normally-off transistor achieves a current of ~ 60% of the normally-on device.

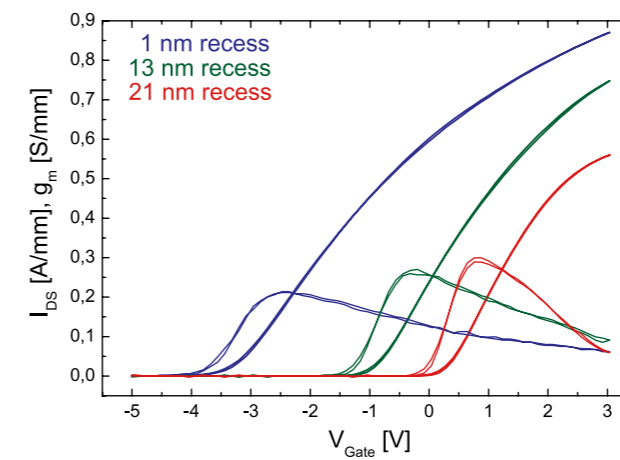


Abb. 4: Transfercharakteristiken für Transistoren mit unterschiedlich tiefem Gate-Recess. Der Übergang von selbstleitendem zu selbstsperrendem Verhalten ist sichtbar ($V_{DS} = 15$ V).
Fig. 4: Transfer characteristics for three transistors with different recess depths, showing the transition from normally-on to normally-off ($V_{DS} = 15$ V)

Durch eine Fluor-basierte Ätzchemie beim Recess-Ätzen kann die Schwellspannung zu noch positiveren Werten hin verschoben werden. Fluor wird in die AlGaN-Barriere eingebaut und bildet negativ geladene Zentren. Diese zusätzlichen Ladungen verstärken das gateinduzierte Verdrängen des 2DEGs und stabilisieren somit die selbstsperrende Charakteristik eines HEMTs mit Gate-Recess. Dann kann der Transistor mit einigen 100 V Drainspannung belastet werden, ohne dass bei 0 V Gatespannung ein nennenswerter Drainstrom fließt, siehe Abb. 5.

The limit of the maximum threshold voltage can be shifted even further when a fluorine-based etch chemistry is used for the recess etching. Some of the fluorine gets incorporated into the remaining AlGaN barrier and forms negatively charged species. This additional charge further depletes the 2DEG below the gate, thus extending the normally-off characteristics. Then, a very high drain bias of several 100 Volts can be applied to the transistor without getting a considerable leakage at 0 V gate bias (see fig. 5).

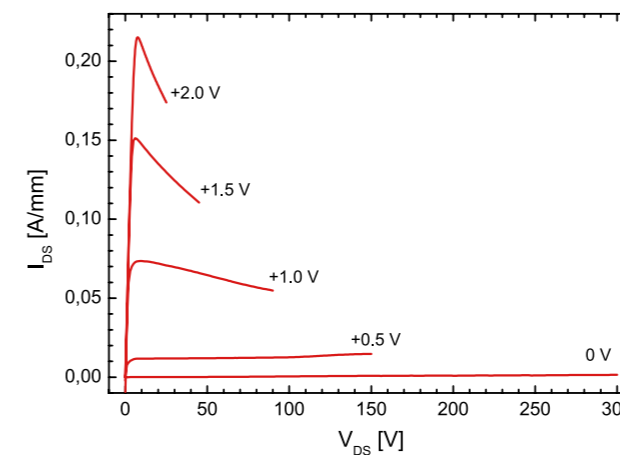


Abb. 5: Ausgangskennlinienfeld eines selbstsperrenden Hochspannungstransistors. Beschriftung der Kurven ist die Gatespannung.
Fig. 5: Output characteristics of a high-voltage normally-off AlGaN/GaN transistor at the gate biases indicated

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG
BUSINESS AREAS & RESEARCH

Mikrowellenkomponenten und -systeme
Microwave Components and Systems

GaN-Elektronik
GaN Electronics

Diodenlaser
Diode Lasers

GaN-Optoelektronik
GaN Optoelectronics

Materialien und Prozesse
Materials and Processes

Netzwerke
Networks



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).

Neben der Chipentwicklung gewinnt die hybride Integration mehrerer aktiver Bauelemente auf einer kompakten mikrooptischen Bank zunehmend an Bedeutung. Auf diese Weise entstehen sehr 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.

Bei den Forschungsarbeiten erreichte das FBH im vergangenen Jahr 2007 neue Bestmarken. Hinsichtlich der Ausgangsleistungen wurden beispielsweise sehr leistungsstarke Breitstreifenlaser (20 W aus 100 µm @ 980 nm) realisiert. Ihr Potential für den zuverlässigen Einsatz in industriellen Anwendungen wurde demonstriert. Die Spitzenleistung im Kurzpulsbetrieb von Breitstreifenlasern konnte auf circa 1 W pro µm Streifenbreite erhöht werden. Bei den 808-nm-Pumplaserbarren wurden Konversionseffizienzen von fast 70% erreicht. DBR-MOPA-Strukturen, die mit industrietauglicher Technologie realisiert wurden, ermöglichen nun mehr als 10 W optischer Leistung mit extrem geringer spektraler Breite und guter Strahlqualität. Sie sind damit sowohl für die effiziente Frequenzverdopplung als auch für die Freiraumkommunikation geeignet. Basierend auf einer hohen Chipqualität und neuen aufbautechnischen Designs konnten stabile, hybrid integrierte kompakte Laserstrahlquellen bei 670 nm mit geringem Energieverbrauch für den mobilen Einsatz in der Stoffanalytik (Ramanspektroskopie) entwickelt werden.

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).

In addition to chip development, hybrid integration of several active 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 2007, the research team at the FBH developed a range of novel optical sources with new world record performance levels. For example, very powerful broad-area lasers with high output powers (20 W from 100 µm @ 980 nm) were realized and their potential for reliable operation in industrial applications was demonstrated. The peak performance in short-pulse operation of broad-area lasers was pushed up to about 1 W per µm stripe width. In addition, a conversion efficiency of 70% was reached with 808 nm pump laser bars. DBR MOPA structures were realized using high yield, industry-compatible device technology, enabling the delivery of more than 10 W optical output power with both an extremely low spectral line width and a good beam quality. These lasers are well suited for efficient frequency doubling as well as for free-space communications. Building on the high quality of the laser chips and new mounting designs, stable, hybrid integrated compact laser sources at 680 nm have been developed, with a low energy consumption suitable for the mobile use in material detection applications such as Raman spectroscopy.

Das FBH deckt mit seinen Kompetenzen den gesamten Teil der Wertschöpfungskette ab: von Simulation und Entwurf der Diodenlaser über die technologische Realisierung bis zum Aufbau einsatzfähiger Diodenlasermodule.

■ **980 nm BA-Laser höchster Leistung und Zuverlässigkeit**

Fertigungsprozesse mit Laserlicht als Präzisionswerkzeug haben nicht nur die Mikroelektronik erobert. So werden leistungsstarke Diodenlaser im Wellenlängenbereich um 980 nm beispielsweise zum Schweißen von Kunststoff oder zum Pumpen von Ytterbium bzw. Erbium dotierten Faserlasern und Verstärkern verwendet. Diese Diodenlaser sollen nicht nur zuverlässig und mit einem hohen Wirkungsgrad arbeiten, sondern das Licht auch mit schmäler vertikaler Divergenz emittieren. Diodenlaser weisen typischerweise hohe vertikale Divergenzwinkel auf, d. h. das Licht verlässt die Laser unter einem hohen Öffnungswinkel. Dies führt dazu, dass es technisch sehr schwierig ist, die eigentlich guten Strahleigenschaften in einem kollimierten, d. h. parallelen Strahl nutzbar zu machen. Das überlegene Design der am FBH entwickelten Diodenlaser schafft hier Abhilfe. Die Verringerung der Divergenzwinkel auf niedrige Werte schafft die Grundlage für die effiziente und kostengünstige Integration der Laser in optische Systeme bei gleichzeitiger Erhaltung der überlegenen Strahleigenschaften.

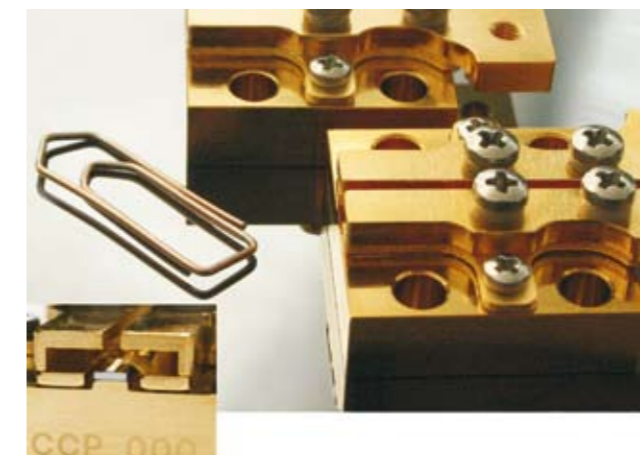


Abb. 1: Breitstreifenlaser aufgebaut auf einem CCP-Halter
Fig. 1: Broad area laser mounted on CCP package

Such developments confirm that the core competences of the FBH cover 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.

■ **980 nm BA-Laser with Highest Power and Reliability**

High-power diode lasers in the wavelength range around 980 nm are used e.g. for the welding of plastics or for pumping ytterbium or erbium doped fibre lasers and amplifiers. These diode lasers should not only work reliably and with a high efficiency, but also emit the light in a small vertical far field angle. Typically diode lasers emit in a very large far field angles, which makes it difficult to collimate the beam, meaning to create a useful parallel beam from the relatively good beam quality.

This can be solved by the superior design of the diodes developed at the FBH. The reduction of the far field angle enables an efficient and low-cost integration of the lasers in optical systems, while simultaneously maintaining the good beam quality.

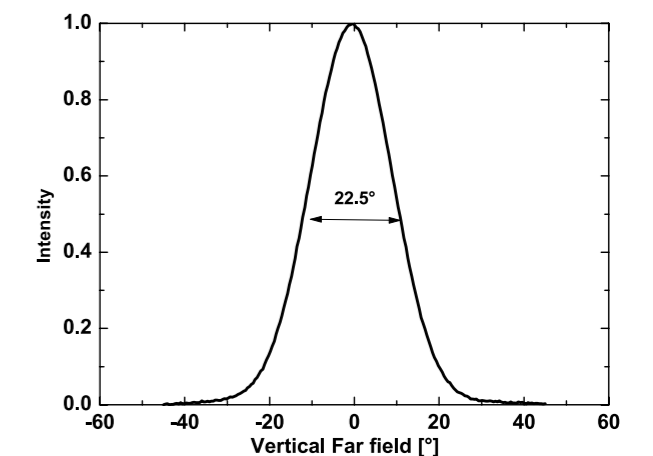
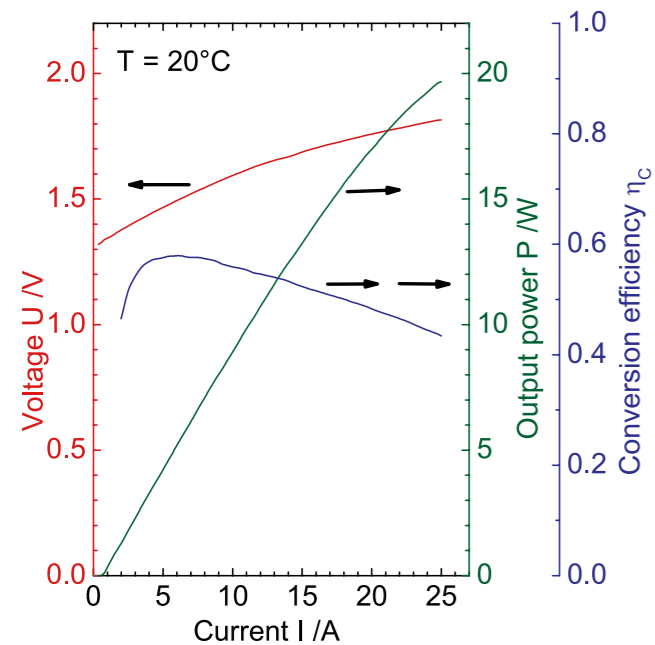


Abb. 2: Vertikales Fernfeld der optimierten Laserstruktur
Fig. 2: Vertical far field of an optimized structure

Das FBH hat effiziente Laserdioden mit hohen Ausgangsleistungen bei relativ schmalen vertikalen Fernfeld entwickelt. Das Schichtdesign wurde untersucht und bezüglich hoher Effizienz und schmaler vertikaler Divergenz optimiert, dabei konnten auch die Verluste durch nichtstrahlende Rekombination minimiert werden. Ein optimiertes Dotierungsprofil garantiert einen geringen Serienwiderstand und eine hinreichende Vermeidung von Verlusten durch freie Ladungsträgerabsorptionen. So ist die vertikale Divergenz mit 15°...23° Halbwertsbreite sehr klein (Abb. 2). Die Laser weisen dadurch bei großen Leistungen über 15 W eine hohe Strahldichte und gute Zuverlässigkeit auf.



The FBH developed efficient diode lasers with high-power and relatively small vertical far field. The epitaxial structure was investigated and optimized with regard to a small vertical far field angle and high efficiency. This was done by reducing the non-radiative recombination rate and improving the doping profile. The latter resulted in a reduced series resistance and a sufficient avoidance of losses due to free carrier absorption. The vertical far field angle could be reduced to 15° to 23° full width at half maximum. Thus the lasers exhibit at high power levels of 15 W a high radiance and also a high reliability.

Abb. 3: Kennlinie für einen 4 mm BA-Laser mit einer Apertur von 100 µm und einer Wellenlänge von 980 nm
Fig. 3: LIV characteristics of a 4 mm broad area laser with an aperture of 100 µm and an emission wavelength of 980 nm

Von den auf einem Riegel befindlichen Einzelemittoren mit einer Resonatorlänge von 4 mm und einer Kontaktstreifenbreite von 100 µm wurden die Kristallflächen, die den Resonator bilden, mit einem vom FBH patentierten Verfahren passiviert und anschließend ver- bzw. entspiegelt. Nach dem Vereinzeln in Laserchips werden diese mit AuSn-Lot auf ausdehnungsangepasste Wärmespreizer aus CuD-Material aufgelötet. Diese Subensembles werden dann auf die eigentlichen Wärmesenken aufgelötet, die aus vergoldetem Kupfer bestehen. Der n-Kontakt wird durch Drahtbonden realisiert. Der thermische Widerstand beträgt nur

Laser bars consist of several single emitters with a length of 4 mm and a width of the contact stripe of 100 µm. The facets of these laser bars, which for the resonator of the individual lasers, have been passivated with a procedure patented by the FBH and were subsequently anti-reflection coated. The separated laser chips are mounted on CuD submounts using AuSn solder. The CuD has the same thermal expansion coefficient as the lasers and serves as a heat spreader. This sub-assembly is then soldered on a gold-coated copper heat sink. The n-contact is made using wire binding. This assembly technology

$R_{th}=2...3$ K/W, so dass die Änderung der Wellenlänge bei thermischer Belastung relativ gering ist. In Abb. 3 sind die Leistung, die Spannung sowie der Wirkungsgrad als Funktion des Betriebsstromes für einen Breitstreifenlaser mit einer Streifenbreite von 100 µm dargestellt. Der Laser zeigt eine Rekordleistung von nahezu 20 W bei 25 A und einen hervorragenden maximalen Wirkungsgrad von 60%.

Die Zuverlässigkeit der Laser spielt für die industriellen Anwender eine entscheidende Rolle. Sie wurde an den Breitstreifenlasern im CW-Betrieb bei Raumtemperatur getestet. Abb. 4 zeigt den Betriebsstrom von sechs Lasern bei Leistungen von 10, 12 bzw. 15 W, gemessen über mehr als 3000 h Betriebszeit. Das ist ein weltweiter Bestwert. In diesem Zeitraum schwankte der Betriebsstrom um weniger als 5%. Dies zeigt das hohe Potential dieser Laser, eine Lebensdauer über 10.000 h bei diesen Leistungen zu erzielen. Trotz des hohen Wirkungsgrades der Diodenlaser konnte die hohe Strahlqualität beibehalten werden. Die laterale Divergenz beträgt 17,1° für 95% der Lichtleistung (Abb. 5).

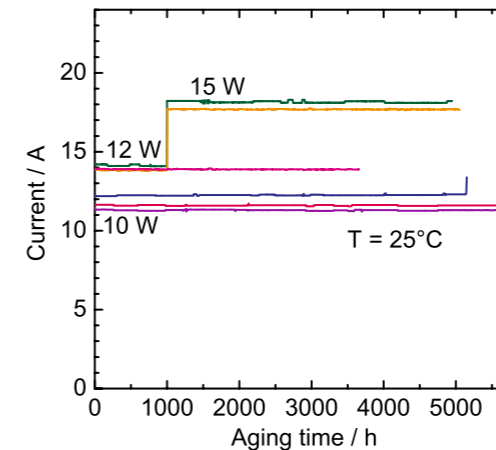


Abb. 4: Zuverlässigkeitsuntersuchungen an BA-Lasern bei 980 nm und mit 100 µm Streifenbreite
Fig. 4: Investigation of the reliability of broad area lasers with an width of the contact stripe of 100 µm at a wavelength of 980 nm

results in a very low thermal resistance (R_{th}) of only 2 - 3 K/W, which reduces the temperature induced wavelength shift with increasing current. Fig. 3 shows the characteristic voltage, optical output power, and efficiency as a function of the current of a broad area laser with a stripe width of 100 µm. The laser shows a record value of the optical output power of approx. 20 W at 25 A and a maximum of the efficiency of about 60%.

For industrial applications the reliability plays a major role. Therefore, broad area laser were tested in cw operation at room temperature. Fig. 4 shows the current as a function of time of six lasers at constant output powers of 10, 12 and 15 W, respectively. These showed a world record reliably operation for more than 3000 h at this power level. During the period of investigation the current drifted by less than 5%, showing a high potential of these lasers to achieve an estimated lifetime of more than 10,000 h as well. The diode lasers show not only a high efficiency but also a good beam quality. The lateral far field angle is only 17.1° containing 95% of the power, and the near field shows a very homogeneous top-hat like characteristic (see fig. 5).

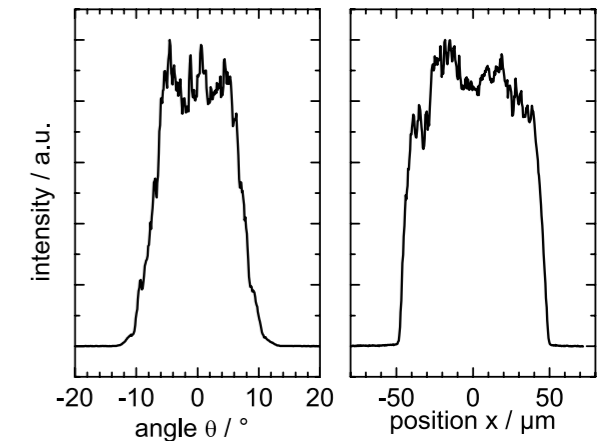


Abb. 5: Strahlqualität bei 20 W optischer Leistung für den Laser aus Abb. 3
Fig. 5: Beam quality at an optical output power of 20 W for the laser shown in fig. 3

Veröffentlichungen // Publications

K. Paschke, S. Einfeldt, A. Ginolas, K. Häusler, P. Ressel, B. Sumpf, H. Wenzel, G. Erbert
"15-W reliable operation of 96-µm aperture broad-area diode lasers emitting at 980 nm",
CLEO, San José, California. Accepted December 2007, published Conference Digest CLEO/QELS 2008.

TM-polarisierte 808-nm-Laserbarren mit 70% Konversionseffizienz bei 80 W optischer Leistung

In der Industrie, beispielsweise in der Automobilfertigung, sind Lasersysteme für die Materialbearbeitung zum Formen, Schneiden oder Schweißen weit verbreitet. Sowohl Metalle als auch Kunststoffe und Keramiken können gleichermaßen verarbeitet werden. Lasersysteme ermöglichen eine hohe Prozessgeschwindigkeit und -genauigkeit, die mit anderen Techniken nicht zu erreichen ist. Außerdem können neue Materialien, wie beispielsweise gehärteter Stahl bearbeitet werden. Breitstreifenlaserdioden wandeln die elektrische Leistung sehr effizient in optische Ausgangsleistungen um. Daher eignen sie sich hervorragend sowohl für den direkten Einsatz als auch zum Pumpen von Festkörper- oder Faserlasern.

Die maximal erreichbare Ausgangsleistung solcher Lasersysteme wird durch zwei Eigenschaften der Laserdioden begrenzt: durch ihre maximale Spitzen- bzw. Ausfallleistung und den Leistungswirkungsgrad η_c , der durch die Gleichung: $P_{CE} = P_{Aus} / P_{in}$ definiert ist. P_{in} gibt die elektrische Eingangsleistung und P_{Aus} die nutzbare optische Ausgangsleistung an. Die nicht als Laserlicht abgestrahlte Leistung wird in Wärme umgewandelt und muss durch Kühlsysteme abgeführt werden – andernfalls erhitzt sich der Laser zu stark und die Leistung sinkt. Darüber hinaus verringert sich die Lebensdauer, da die Degradationsrate exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Aus diesen Gründen werden möglichst große Werte von η_c angestrebt.

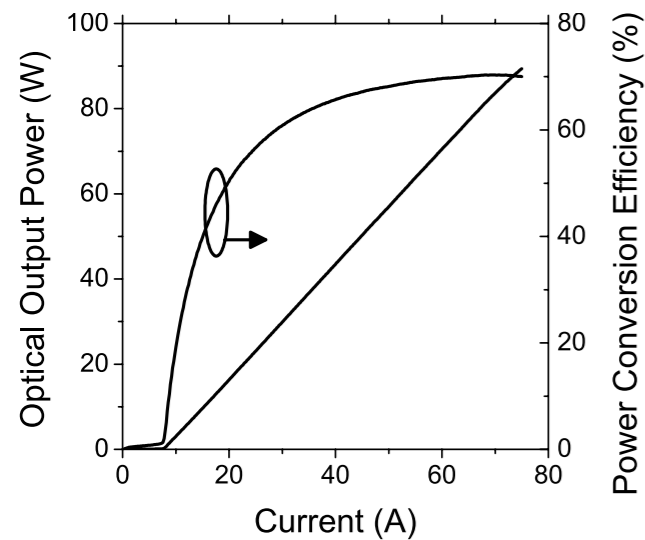


Abb. 1: Am FBH entwickelte 808 nm TM-polarisierte Laserbarren mit einem Wirkungsgrad > 70% bei 80 W optischer Ausgangsleistung
 Fig. 1: 808 nm TM polarized laser bars have recently been developed at the FBH with peak efficiency of > 70% at 80 W power output

TM Polarized 808 nm Laser Bars with 70% Power Conversion Efficiency at 80 W Output Power

Modern industrial manufacturing groups make wide use of laser systems to shape, cut, weld and otherwise prepare materials for commercial use – one well known example is modern automobile manufacture. Metals, plastics, ceramics are all currently prepared in this way. Laser systems enable processing speeds and a precision inaccessible by other techniques, and also enable the use of new materials such as hardened steel. High-power broad area diode lasers efficiently convert electrical input power into optical output power and consequently are important sources for these applications – either for direct use or as a pump source for other lasers such as solid state or fiber lasers.

The maximum achievable output power from such systems is limited at source by two features of the semiconductor lasers: their peak achievable (failure) power and their power conversion efficiency, η_c , defined by: $P_{CE} = P_{out} / P_{in}$, where P_{in} is the electrical input power and P_{out} is the useful emitted optical power. All power that is not optically emitted either must be carried away by a cooling system or remains in the semiconductor, increasing its temperature. As the diode laser is driven to higher powers, the temperature increases, and performance degrades, eventually limiting peak achievable power (the device rolls over). The degradation rate of the material also increases typically exponentially with temperature, limiting useful lifetime. In short, the highest values of η_c possible are required.



Ein zweiter Begrenzungsfaktor für die Leistung ist durch die Zerstörung der Facette bedingt, verursacht durch die Erzeugung von Defekten an der Ausgangs-facette. Dieser sogenannte COMD-Prozess begrenzt die maximal mögliche optische Leistungsdichte, die der Diodenlaser ohne Ausfall erreichen kann.

Sowohl COMD als auch η_c wurden am FBH eingehend untersucht, wobei sich die meisten Arbeiten auf 980-nm-Breitstreifenlaserdioden für Erbium-dotierte Faserverstärker und Faserlaser konzentrierten. Das Ferdinand-Braun-Institut hat mit diesen Laserbarren bereits einen optischen Leistungswirkungsgrad von 73% demonstriert.

Während bei den 980-nm-Lasern damit deutliche Verbesserungen erzielt werden konnten, waren die Fortschritte bei TM-polarisierten 808-nm-Quellen bislang vergleichsweise gering. Solche Laser werden für Nd:YAG-Festkörperlaser benötigt, und erreichen lediglich einen Wirkungsgrad um 60%.

A second limitation is facet failure due to catastrophic optical mirror damage (COMD) – this defines the largest possible power density that the emitting surface of the laser can tolerate before material failure, and is typically the ultimate limit of the optical power density in the system.

Both COMD and η_c have been extensively studied, with most work focused on 980 nm broad area diode lasers, as required for Erbium-doped fiber amplifiers and fiber lasers. Here, the Ferdinand-Braun-Institut has previously demonstrated bars with a power conversion efficiency of 73%.

Although significant advances have been shown in 980 nm material, relatively little recent progress has been reported for TM polarized 808 nm sources, which are important for Nd:YAG solid state laser systems and reach just values around 60%. In the past year, the Ferdinand-Braun-Institut has combined its high efficiency 980 nm structures with optimized GaAsP tensile strained quantum wells as TM polarized

2007 hat das Ferdinand-Braun-Institut seine bei den hocheffizienten 980-nm-Strukturen erfolgreich eingesetzte Technologie auf 808-nm-Laser mit zugverspannten GaAsP-Quantentrögen angepasst. Da der Wirkungsgrad durch das hohe Schwellenstromniveau der Quantentröge begrenzt ist, wurden die Reflexion der Facette optimiert und die Leistungsdichte in den GaAsP-Quantentrögen erhöht. Damit konnten TM-polarisierte Laserbarren bei 808 nm mit einem Leistungswirkungsgrad von > 70% nachgewiesen werden, wie Abb. 1 zeigt. Die Laserbarren wurden auf passiv-gekühlte Wärmesenken montiert. Dank ihres hohen Wirkungsgrades wurden Ausgangsleistungen von mehr als 80 W ohne thermisches Überrollen erreicht.

Dabei wurde eine am Ferdinand-Braun-Institut entwickelte ZnSe-Facettenpassivierungstechnologie genutzt. Laser, die mit dieser Technologie hergestellt werden, fallen – im Vergleich zu den mit der üblichen Oxid-basierten Facettenbeschichtung gefertigten – deutlich seltener aus. Laser mit ZnSe-Passivierung zeigen bei hohen Leistungen ein thermisches Überrollen und keinen COMD-Effekt, siehe Abb. 2. Dies belegt die Robustheit und hohe Qualität dieser Technologie.

Abb. 2: Mit der FBH-Facettenpassivierung hergestellte Einzelstreifen-Diodenlaser mit 100 µm Streifenbreite zeigen thermisches Überrollen und kein COMD

Fig. 2: Single emitters with 100 µm stripe (taken from high efficiency bars) are found to roll thermally without damage when FBH facet passivation is used

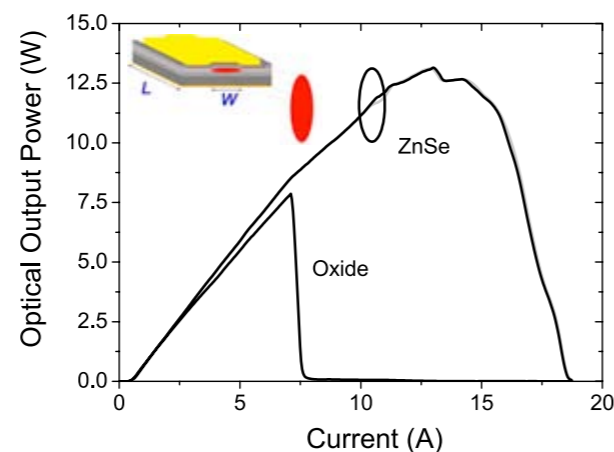
Veröffentlichungen // Publications

P. Crump, et al., "100-W diode laser bars show > 71% power conversion from 790-nm to 1000-nm and have clear route to 85%", Proc. SPIE, vol. 6456, pp. 64560M-1–64560M-11, 2007, Paper 19.

P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, S. Einfeldt, P. Ressel, M. Zorn, F. Bugge, M. Spreemann, F. Dittmar, R. Staske, G. Tränkle, "808-nm TM Polarised High Power Broad Area Lasers with 69.5% Power Conversion Efficiency at 71-W". Accepted for publication December 2007, published 2008 Conference Digest CLEO/QELS, Paper CMN3.

gain material. The efficiency was found to be limited by the relatively high threshold current level of the quantum well material, which FBH addressed by carefully optimized facet reflectivity and increased overlap of the optical mode with the quantum well. With these precautions, 808 nm TM polarized laser bars with > 70% power conversion efficiency have been demonstrated, as shown in fig. 1. The bars were mounted on passively cooled heatsinks and their high efficiency enabled FBH to reach over 80 W without any thermal rollover.

The Ferdinand-Braun-Institut has previously developed high-quality facet passivation technology, which also benefits this material. FBH found that conventional oxide coated devices failed at the facets but when ZnSe passivation is used and that they roll thermally without failure, as shown in fig. 2 for example single emitter devices, confirming the robustness and quality of the technology.



Pulsspitzenleistungen von ~ 1 W pro µm zeigen die Qualität von Facettentechnologie und Chipdesign

Hochleistungs-Laserdioden mit einem geringen vertikalen Fernfeld und einer Emissionswellenlänge von 1100 nm werden als Pump Laserquellen für Ho³⁺- und Tm³⁺-dotierte Faserlaser und Raman-Verstärker in der Telekommunikation benötigt. Die Laserdioden zeichnen sich durch kleine Abmessungen, geringen Energieverbrauch, eine hohe Zuverlässigkeit sowie eine sehr hohe optische Ausgangsleistung aus. Damit eignen sich diese Strahlquellen sehr gut als Werkzeuge für die direkte Materialbearbeitung.

Die maximale erreichbare optische Leistung ist eine der wichtigsten Bewertungskriterien für Hochleistungs-Laserdioden. Sie hängt im Wesentlichen ab vom Laserdesign, dem epitaktischen Wachstumsprozess, der Spiegelfacetten-Technologie und der Wärmeabführung während des Laserbetriebes. Mit dem optimierten Laserdiodendesign für 1100 nm, der qualitativ hochwertigen Epitaxie mit geringem Defektwachstum und der vom FBH patentierten Facettenpassivierung wurde die Spitzenausgangsleistung von ca. 1 W pro µm Streifenbreite erreicht. Das FBH hat dabei mehr als 55 W Ausgangsleistung bei einer Streifenbreite von 60 µm und einer Resonatorlänge von 4 mm unter Kurzpulsanregung ohne thermische Effekte demonstriert.

Design und Herstellungsprozess

Die Laserstruktur für eine Wellenlänge von 1100 nm wurde im Hinblick auf einen kleinen vertikalen Abstrahlwinkel von 18° FWHM entworfen. Die Struktur wurde mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) gewachsen. Durch die Verwendung einer hochdruckverspannten InGaAs-Mehrfachquantengraben-Struktur als aktives Material, eingebettet in einem 3,4 µm dicken GaAs-Wellenleiter werden die hohe Ausgangsleistung sowie das schmale vertikale Fernfeld möglich. Das Dotierungsprofil wurde dahingehend optimiert, um die freie Ladungsträgerabsorption zu reduzieren und einen geringen Serienwiderstand zu erreichen.

Die Strukturen wurden als 4 mm lange Einzelemittler mit einer Streifenbreite von 60 µm und 100 µm realisiert. Unter Verwendung der vom FBH patentierten Facettenpassivierung mit ZnSe wurden die Resonatorspiegel (Kristallfacetten) behandelt. Dieses Verfahren garantiert Langzeitstabilität sowie Schutz vor Catastrophic Optical Mirror Damage (COMD). Die

Peak Power of ~1 W per µm Demonstrates Quality and Robustness of FBH Facet Technology and Chip Design

High-power laser diodes with small vertical far-field emitting at and above 1100 nm are important direct pumping sources for Ho³⁺, Tm³⁺-doped silica fibers and Raman amplifiers in telecommunications. Additionally, due to their small dimensions, low energy consumption, high reliability and superior output power, these sources are perfect tools for direct materials processing.

The maximum achievable optical power is one of the most important criteria for high-power laser diodes and depends on the laser design, the epitaxial growth, the mirror facet technology and the heat removal during laser operation. Using optimized 1100 nm laser designs and high-quality low-defect epitaxial growth and materials processing, together with FBH-patented facet passivation enables Ferdinand-Braun-Institut to achieve a peak output power of close to 1 W per µm stripe width. More precisely, FBH has demonstrated more than 55 W from devices with 60 µm stripe width and 4 mm cavity length, under short pulse "zero heat" conditions.

Design and fabrication

The 1100 nm structure was designed to emit light into a small 18° vertical angle and was grown by means of metal organic vapour phase epitaxy. The high-power and small vertical divergence design uses highly compressive-strained multiquantum-InGaAs-wells embedded in thick GaAs-waveguide layers. The doping profile has been optimized to reduce free carrier absorption and to guarantee low series resistance.

The structures were fabricated as 4 mm long single emitters devices with either 60 µm or 100 µm stripe widths. Mirror facets are passivated using FBH's patented treatment with ZnSe prior to normal high-reflection/low-reflection coating. This procedure guarantees long-term stability and protection from Catastrophic Optical Mirror Damage (COMD) failure. The laser chips are mounted p-side down on CuW submounts and soldered, using AuZn/PbSn on c-mount.

Laserchips wurden mit der p-Epitaxienseite auf CuW-Zwischenträger unter Verwendung von AuSn-Lot montiert und mit PbSn auf eine C-Mount-Wärmesenke gelötet.

Laser-Leistungsdaten

Abb. 2 zeigt die Kennlinien einer 4 mm langen und 100 µm breiten Laserdiode, die unter Dauerstrich und Kurzpuls-Anregungsbedingungen charakterisiert wurde. Wird die Pulsbreite bis auf 300 ns verringert, lässt sich die interne Wärmeentwicklung stark reduzieren. Demzufolge erhöht sich die Ausgangsleistung von 7 W (CW-Betrieb) auf 57 W, dies entspricht einer linearen Dichteleistung von 0,57 W/µm. Die weitere Optimierung des Laserdiodendesigns ermöglicht es, eine Leistung von 55 W bei 60 µm Streifenbreite zu erreichen, was einer Leistungsdichte von 0,9 W/µm (vgl. Abb. 3) entspricht.

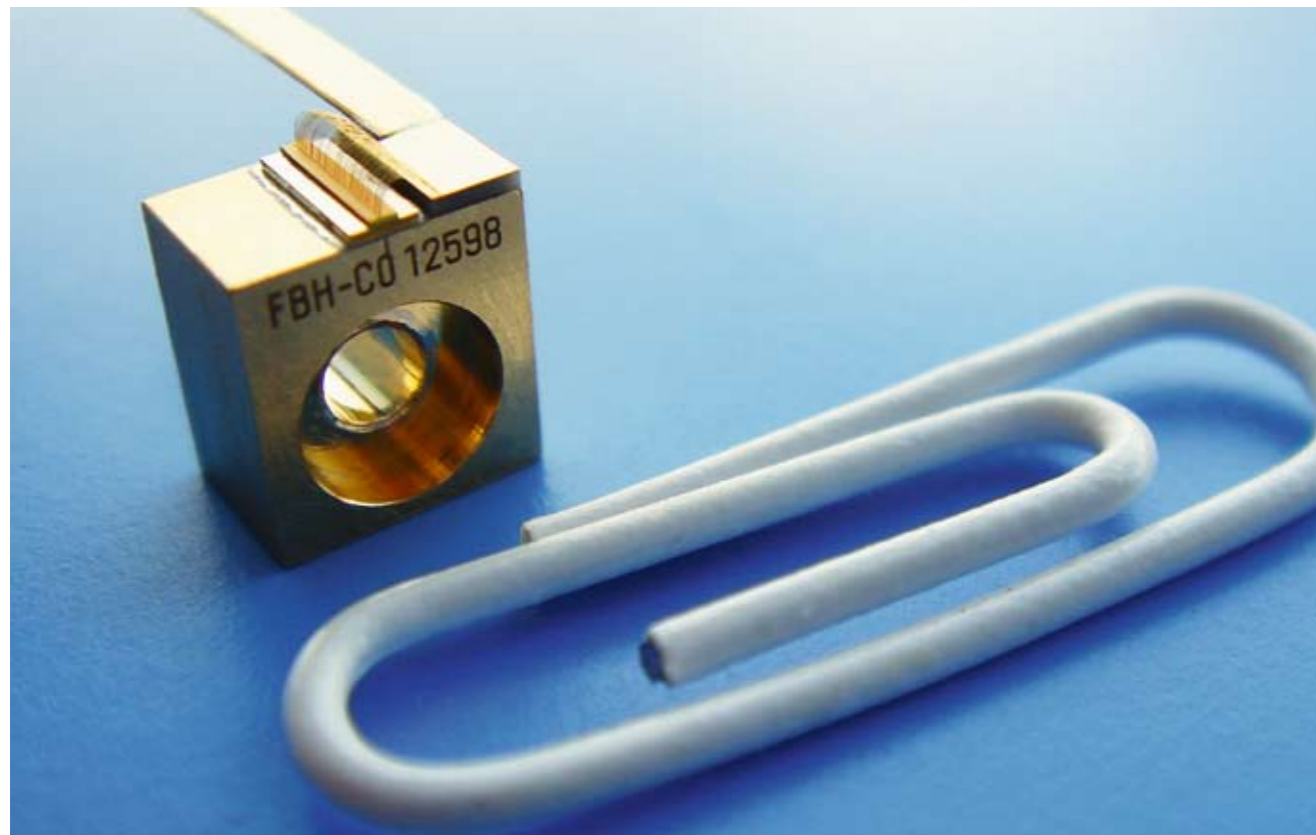


Abb. 1: Auf C-Mount aufgelöteter Laserchip mit einer Resonatorlänge von 4 mm
Fig. 1: The 4 mm long laser chip mounted p-side down on c-mount package

Laser performance

Fig. 2 presents the power-current characteristics of an example structure fabricated with a 100 µm stripe width and 4 mm cavity length laser diode tested under both continuous wave (cw) and short pulse conditions. As the current pulse width is reduced to 300 ns, the internal heating of the structure is also reduced, increasing the peak power from 7 W (cw) to 57 W, corresponding to a linear density power of 0.57 W/µm. Further optimization of the device design enabled FBH to achieve 55 W from 60 µm stripe devices, which corresponds to 0.9 W/µm linear power density as shown in fig. 3.

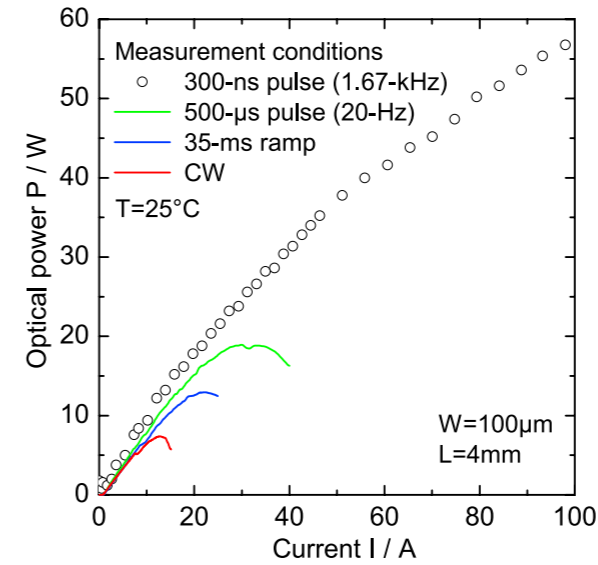


Abb. 2: Leistungs-Strom-Kennlinien von Dauerstrich-Betrieb bis 300 ns Kurzpulsanregung, Raum Temperatur 25°C (DQW Struktur, 100 µm Streifenbreite, 4 mm Resonatorlänge, aufgebaut auf C-Mount)

Fig. 2: Power-current characteristics under operating conditions from cw to short current pulse of 300 ns, ambient temperature 25°C (DQW structure, 100 µm stripe width, 4 mm cavity length, mounted on c-mount)

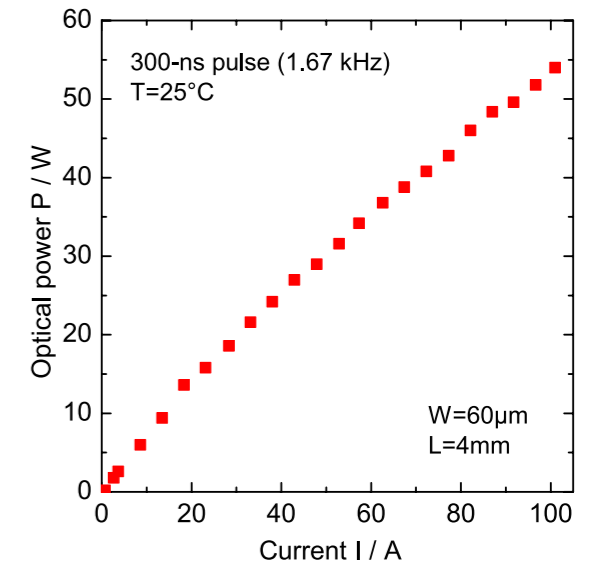


Abb. 3: Leistungs-Strom-Kennlinie einer verbesserten Struktur. Anregungsbedingungen: 300 ns Pulsbreite, Tastverhältnis 0,01%, Raumtemperatur 25°C.

Fig. 3: Power-current characteristic of an improved structure, measured under 300 ns pulse condition at 25°C ambient temperature.

Grundmode-Laser mit geringer Strahldivergenz und einer Leistung von mehr als 1 Watt

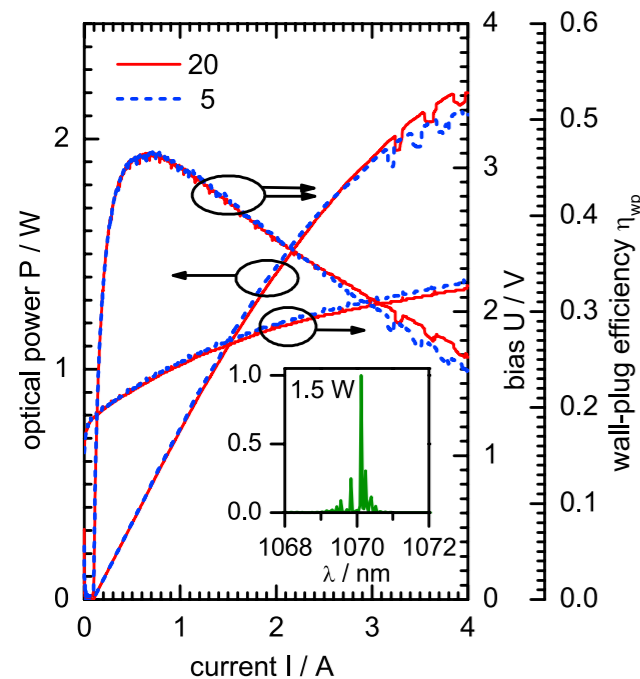
Für eine Reihe von Anwendungen werden Diodenlaser mit einer optischen Ausgangsleistung von 1 Watt und mehr in einer räumlichen Grundmode benötigt, wie beispielsweise zur Frei-Raum-Kommunikation, nichtlinearen Frequenzkonversion und zum Pumpen von Grundmode-Fasern und -Verstärkern. Dafür muss der laterale Wellenleiter im Laser schmal genug und der definierende Effektiv-Index-Sprung hinreichend klein sein, um die Ausbreitung höherer Moden zu verhindern. Die kleine lichtemittierende Fläche begrenzt jedoch die maximale optische Ausgangsleistung, weil die hohe Lichtintensität zu einer Zerstörung des Halbleitermaterials führen kann. Eine Vergrößerung der Wellenleiterbreite führt auf der anderen Seite zu einem instabilen Laserverhalten, das sich in Knicken in den Leistungs-Strom-Kennlinien, einem schwankenden Laserstrahl und der Emission von Moden höherer Ordnung äußert.

Narrow-Divergence Fundamental Mode Lasers with More than 1 Watt Optical Power

Fundamental-spatial mode diode lasers with an output power in the 1 W range and above are interesting for a variety of applications, including free-space optical communications, nonlinear frequency conversion and pumping of rare-earth doped single-mode fibers and amplifiers. In particular, this requires a narrow lateral waveguide which is defined by a small effective index step in order to cut off the propagation of higher order modes. The narrow contact width of the devices inherently limits the output power because of the small light-emitting area and the high optical intensity, which induces catastrophic optical damage. An increase of the ridge width typically leads to several instabilities manifesting in kinks in the power-current characteristics, beam-steering and the appearance of higher-order lateral modes in the lasing emission.

Um mit AlGaAs-basierten Rippenwellenleiter-Lasern (RW-Lasern) eine Ausgangsleistung von mehr als einem Watt in einem beugungsbegrenzten Strahl zu erhalten, war eine sorgfältige Optimierung der vertikalen und lateralen Schicht-Struktur notwendig. Die aktive Zone aus InGaAs/GaAsP wurde asymmetrisch in einem 4,8 μm breiten Wellenleiter platziert, um eine geringe vertikale Strahldivergenz sicherzustellen. Dadurch konnte eine volle Halbwertsbreite des vertikalen Fernfeldintensitätsprofils von nur 15° erreicht werden. Um die laterale Grund-Mode zu stabilisieren, wurde die Breite der seitlichen Gräben, die den lateralen Wellenleiter in Form einer Rippe definieren, von 20 μm auf 5 μm reduziert. Die reduzierte Grabenbreite führt zu einer seitlichen Abstrahlung eines Teils der Lichtintensität. Die damit verbundenen optischen Verluste sind für die höheren lateralen Moden größer als für die Grundmode. Bei einer geeigneten Wahl von Grabenbreite, Breite des Rippenwellenleiters und Effektiv-Index-Sprung kann so die Emission höherer lateraler Moden verhindert werden.

Abb. 1 zeigt die optische Ausgangsleistung, die anliegende Spannung und die Konversionseffizienz als Funktion des Stromes durch einen 3,9 mm langen Laser, welcher mit der Epitaxieseite nach unten auf eine Wärmesenke aufgebaut wurde. Deren Temperatur wurde konstant bei 25°C gehalten.



FBH carefully optimized the vertical and lateral layer structure of AlGaAs-based ridge waveguide (RW) lasers in order to obtain an output power of more than 1 W maintaining a diffraction-limited beam quality. In order to facilitate a small vertical far-field divergence, the InGaAs/GaAsP double quantum well structure acting as active region was placed asymmetrically into a 4.8 μm wide waveguide core. The full width at half maximum (FWHM) of the vertical far-field intensity is only 15° under pulsed operation. In order to stabilize the lateral fundamental mode, the width of the trenches defining the RWs was reduced from 20 to 5 μm . Due to the reduced trench width, radiation leaks into the outer high-index regions so that only complex guided modes exist. In general, the associated loss rises with mode order and decreases with increasing trench width, RW width and effective index step.

Fig. 1 shows optical power, voltage and wall-plug efficiency versus injection current of p-down mounted 3.9 mm long lasers at a heat sink temperature of 25°C . There is almost no difference between the characteristics of the 5 and 20 μm trench-width devices. The threshold currents are 100 mA, the slope efficiencies determined slightly above threshold are 0.8 W/A and the maximum wall-plug efficiencies reaches 47% at an output power of 500 mW.

Abb. 1: Im Dauerstrichbetrieb bei einer Wärmesenkentemperatur von 25°C gemessene Leistungs-Strom-Kennlinien eines RW-Laser mit einer Rippenbreite von 5 μm und Grabenbreiten von 20 μm (rot durchgezogen) und 5 μm (blau gestrichelt). Inset: Optisches Spektrum bei einer Leistung von 1,5 W (5 μm Grabenbreite).
Fig. 1: CW light-current characteristics of RW lasers with a ridge width of 5 μm and trench widths of 20 μm (red solid) and 5 μm (blue dashed). Inset: Optical spectrum at an output power of 1.5 W (5 μm trench width). Heat sink temperature is 25°C .

Die Kennlinien der Laser mit den Grabenbreiten von 5 und 20 μm unterscheiden sich so gut wie nicht. Der Schwellenstrom beträgt 100 mA, der Anstieg der Leistungs-Strom-Kennlinie bestimmt knapp oberhalb der Laserschwelle 0,8 W/A und die maximale Konversionseffizienz erreicht 47% bei einer Ausgangsleistung von 500 mW. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Abstrahlungsverluste der Lasermode in beiden Varianten nahezu gleich und sehr klein sind. Die Leistungs-Strom-Kennlinie ist knickfrei bis zu einer Ausgangsleistung von $P = 1,9 \text{ W}$ ($I = 3 \text{ A}$). Die maximale Ausgangsleistung ist größer als 2 W bei $I = 4 \text{ A}$. Die eingefügte Abbildung zeigt ein optisches Spektrum bei einer Ausgangsleistung von 1,5 W.

Eine Falschfarben-Darstellung der lateralen Fernfeldintensität als Funktion des Injektionsstromes gibt Aufschluss über Moden-Stabilität und Moden-Reinheit. Diese in Abb. 2 gezeigten Darstellungen wurden erhalten, indem der Laserstrahl auf einem Schirm mit einer CCD-Kamera aufgenommen wurde. Beide Laser emittieren bis zu einer Ausgangsleistung von $P = 1 \text{ W}$ ($I = 1,3 \text{ A}$) ein stabiles Gaußförmiges Fernfeld. Mit zunehmender Ausgangsleistung wird das Fernfeld des Lasers mit 20 μm Grabenbreite

Thus, the lasing mode of the device with the smaller trench width does not experience additional radiation losses. The power-current characteristics are kink-free up to $P = 1.9 \text{ W}$ ($I = 3 \text{ A}$). The maximum output power exceeds 2 W at $I = 4 \text{ A}$. An optical spectrum recorded at an output power of 1.5 W is shown in the inset of fig. 1.

Color scale maps of the lateral far-field intensity profiles give information on mode stability and purity. These maps shown in fig. 2 were recorded with a CCD camera by imaging the laser emission on a screen. Both devices emit in a stable Gaussian-like far-field up to $P = 1 \text{ W}$ ($I = 1.3 \text{ A}$). With increasing power (current), the device with the 20 μm trench width exhibits more and more beam steering and a very pronounced widening, narrowing and double-peaking of the far-field above $P = 1.5 \text{ W}$ ($I = 2.1 \text{ A}$).

The near- and far-field intensity profiles of the 5 μm trench-width device measured at an output power of 1.5 W with the moving slit method are shown in fig. 3. The near-field profiles are consistent with fundamental transversal mode lasing. The beam propagation ratio using the second moments is $M^2 = 1.3$ for both axes.

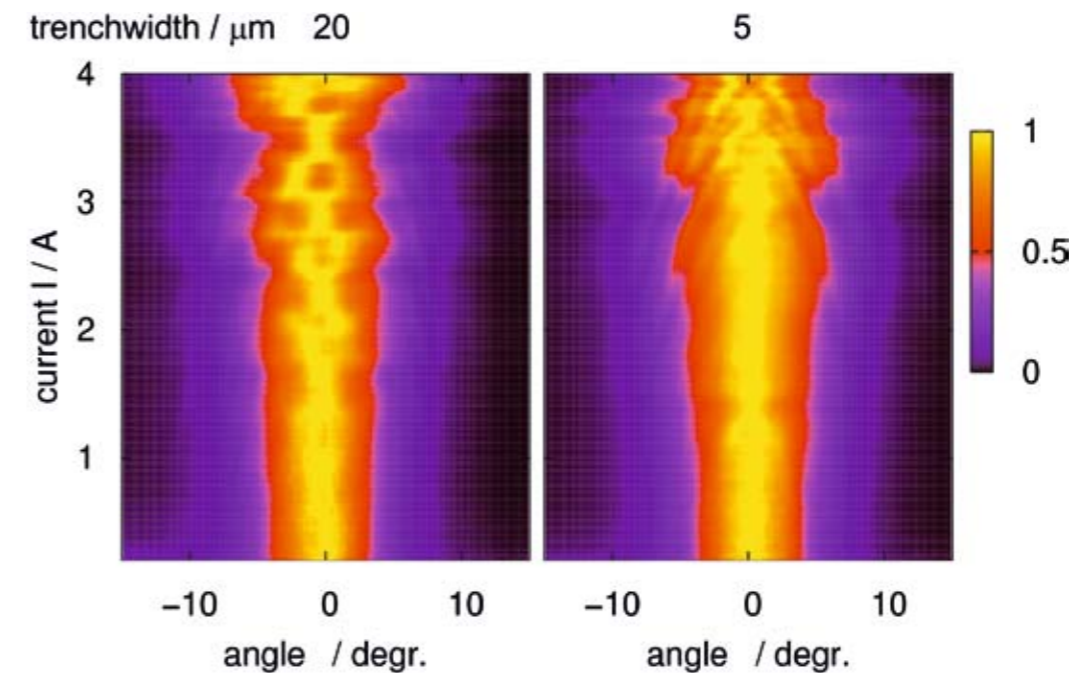


Abb. 2: Falschfarbendarstellung der Intensität des lateralen Fernfeldes als Funktion des Injektionsstromes. Die Grabenbreite ist 20 μm (links) und 5 μm (rechts). Schwarz (gelb) bedeutet keine (höchste) Intensität, welche für jeden Strom auf 1 normiert wurde.
Fig. 2: Color-scale mapping of the lateral far-field intensity profiles versus injection current for the trench widths indicated on top. Black color corresponds to zero intensity, yellow to maximum intensity normalized to one for every current.

immer instabiler, während das Fernfeld des Laser mit 5 μm Grabenbreite sich bis zu einer Ausgangsleistung von fast 2 W ($I = 3 \text{ A}$) nur wenig ändert. Dies kann auf die Unterdrückung höherer lateraler Moden durch deren erhöhte Strahlungsverluste zurückgeführt werden.

Bei einer Ausgangsleistung von 1,5 W mit der Methode des bewegten Spaltes gemessene Intensitätsprofile des Nah- und Fernfeldes des Laser mit 5 μm Grabenbreite werden in Abb. 3 gezeigt. Die Nahfeldprofile zeigen das Lasern der fundamentalen räumlichen Grundmode. Der Strahlqualitätsfaktor beträgt $M^2 = 1,3$ für beide Richtungen (vertikal und lateral). Somit emittiert der Laser einen Strahl hoher Güte, welcher ideal für die oben erwähnten Anwendungen geeignet ist.

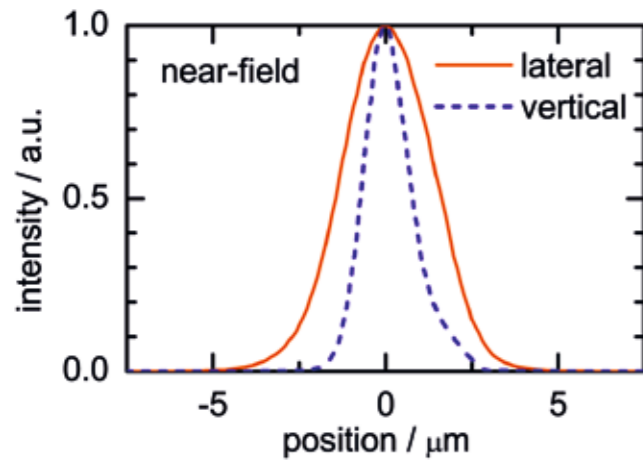


Abb. 3 links: Laterale (rot durchgezogen) und vertikale (blau gestrichelt) Profile der Nahfeldintensität bei einer Ausgangsleistung von 1,5 W.
Fig. 3 left: lateral (red solid line) and vertical (blue dashes) near-field intensity profiles with ridge and trench widths of 5 μm at an output power of 1.5 W.

Thus, the laser emits in a high-quality beam suitable for imaging into single mode fibers and waveguides.

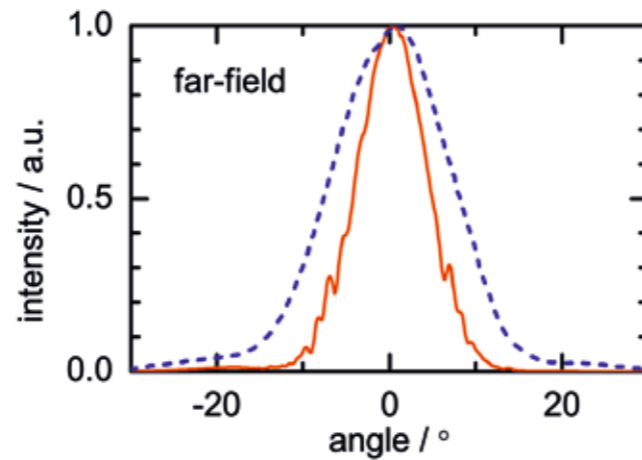


Abb. 3 rechts: Entsprechende Profile der Fernfeldintensität. Die Grabenbreite ist 5 μm .
Fig. 3 right: Corresponding far-field profiles

Veröffentlichungen // Publications

H. Wenzel, M. Dallmer, F. Bugge, J. Fricke, K.-H. Hasler, G. Erbert, "Fundamental-lateral mode stabilized high-power ridge-waveguide lasers", Conference Digest CLEO/Europe 2007, Paper CB11-1.

H. Wenzel, M. Dallmer, G. Erbert, "Thermal lensing in high-power ridge-waveguide lasers", Proceedings NUDOD'07, Paper MB2.

H. Wenzel, M. Dallmer, G. Erbert, "Thermal lensing in high-power ridge-waveguide lasers", J. Opt. Quant. Electron. Accepted 2007, published 2008.

Modulierbare, frequenzstabile 1060 nm Diodenlaser für die effiziente Frequenzverdopplung in Displayanwendungen

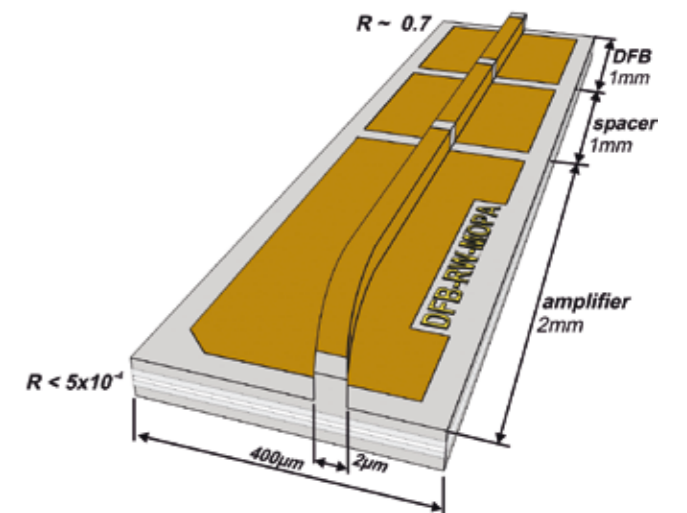
Laserprojektoren erfordern als Lichtquellen kleine, effiziente Laser mit einer Emission in den Grundfarben Rot, Grün und Blau. Halbleiterlaser sind für diese Anwendung attraktiv, da sie neben ihrer hohen Effizienz die Möglichkeit zur einfachen Leistungsmodulation bieten. Brillante, bewegte Bilder könnten mit einem aus Halbleitern erzeugten Flying-Spot über die Modulation der Pumpströme der einzelnen Laser erzeugt werden. Da zurzeit keine im grünen Spektralbereich emittierenden Halbleiterlaser zur Verfügung stehen, werden am FBH Pump Laser entwickelt, bei denen das grüne Licht durch nichtlineare Frequenzverdopplung in einem externen, periodisch gepolten Lithiumniobat (PPLN) Kristall erzeugt wird. Der nichtlineare Kristall stellt bezüglich des infraroten Pumplichtes einen räumlichen und spektralen Filter dar und erfordert eine maßgeschneiderte Anpassung der Emissionseigenschaften der Pumpquelle. Dazu muss die Strahlqualität nahezu beugungsbegrenzt und die spektrale Breite des Pumplichtes kleiner sein als der Akzeptanzbereich des nichtlinearen Kristalls von typischerweise 0,2 nm. Zudem müssen die räumlichen und spektralen Strahleigenschaften sogar unter Strommodulation stabil bleiben.

Je nach Anwendung werden einige 10 mW oder einige 100 mW grüne Lichtleistung benötigt. Dem entsprechend wurden am FBH zwei unterschiedliche Pumpquellen entwickelt. Für den unteren Leistungsbereich wird zur Frequenzverdopplung ein Pump Laser mit einer Ausgangsleistung von bis zu 300 mW und einer großen Kopplungseffizienz zum verwendeten nichtlinearen Wellenleiterkristall benötigt. Dazu wurde ein wellenlängen-stabilisierter Laser mit verteilter

Frequency-Stable 1060 nm Diode Lasers Suitable for Power Modulation and Efficient Frequency Doubling in Display Applications

Laser projectors require small, efficient lasers as light sources for the basic colors red, green and blue. Diode lasers are very attractive for this application, as they can easily be modulated and are furthermore highly efficient. Brilliant moving pictures can be rendered by using a flying spot, which color and intensity can be adjusted by modulating the injection currents into the corresponding diode lasers. Currently no green emitting diode lasers are available. Thus, non-linear frequency conversion in a periodically poled lithium niobate (PPLN crystal) can be used in order to convert the infra-red light of the diode laser into the green spectral region. The non-linear crystal acts like a spectral and spatial filter with respect to the infra-red pump light. Therefore the emission properties of the pump source need to be adjusted precisely: A nearly diffraction limited beam with a spectral width smaller than the acceptance range of the non-linear crystal of typically 0.2 nm is needed. Moreover, the spatial and spectral beam properties must remain stable under current modulation.

Depending on the respective application, several 10 mW or several 100 mW green light power are needed. According to this, the FBH developed two different pump sources. For the lower power range a pump laser with an output power of up to 300 mW and a large coupling efficiency to the non-linear waveguide crystal is needed. In order to achieve this, a frequency-stabilized laser with a distributed



Rückkopplung (Distributed Feedback, DFB) und ein Halbleiterverstärker monolithisch in einem Chip integriert. Der sogenannte DFB-RW-MOPA (Master-Oscillator Power-Amplifier) mit einer Gesamtlänge von 4 mm hat einen durchgehenden schmalen Rippen-Wellenleiter (RW) mit einer Breite von $2\ \mu\text{m}$, um nur die laterale Grundmode zu führen. Das Bragg-Gitter des DFB-Lasers mit einer Periode von ca. $320\ \text{nm}$ (Abb. 1) wird mit Hilfe holografischer Fotolithografie erzeugt und durch eine Zweischrittepitaxie in die Halbleiterstruktur integriert.

Der RW-DFB-MOPA erreicht bei einem DFB-Laser-Strom von $150\ \text{mA}$ und einem Verstärkerstrom von $400\ \text{mA}$ eine optische Ausgangsleistung von $325\ \text{mW}$. Wie Abb. 2 zeigt, kann die optische Leistung linear zwischen nahezu 0 und der maximalen Leistung variiert werden. Die thermisch bedingte Verschiebung der Emissionswellenlänge bei Erhöhung des Verstärker-Stromes beträgt $0,16\ \text{nm}$ und ist damit geringer als die spektrale Akzeptanz des ausgewählten PPLN-Wellenleiterkristalls von $0,2\ \text{nm}$. Aufgrund der spektralen Eigenschaften sowie der geringen, für alle Verstärker-Ströme konstanten Fernfeldwinkel (lateral 8° , vertikal 20°) eignet sich der RW-DFB-MOPA ideal für die Frequenzkonversion mit einem PPLN Wellenleiterkristall. Die Ausgangsleistung des frequenzverdoppelten Lichtes lässt sich

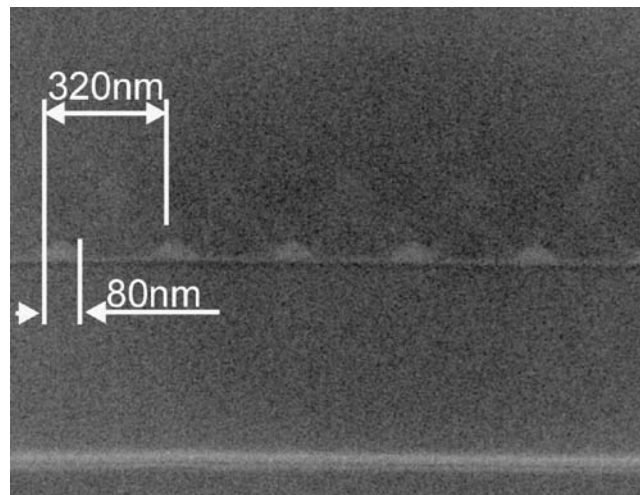


Abb. 1: Rasterelektronen-Mikroskopaufnahme eines Schnitts durch den DFB-Laser entlang der Resonatorachse

Fig. 1: Scanning electron microscope picture of the cross section of a DFB laser along the resonator axis

feedback (DFB) and a semiconductor amplifier is monolithically integrated in a single chip. This so-called DFB-RW-MOPA (Master-Oscillator Power-Amplifier), which has a total length of $4\ \text{mm}$, has a continuous ridge waveguide (RW) with a width of $2\ \mu\text{m}$ to guide only the fundamental mode. The Bragg grating of the DFB laser with a period of approx. $320\ \text{nm}$ (fig. 1) is defined with holographic photolithography. It is integrated into the semiconductor layer structure with a two-step epitaxy.

The RW-DFB-MOPA reaches an optical output power of $325\ \text{mW}$ for a DFB current of $150\ \text{mA}$ and an amplifier current of $400\ \text{mA}$. Fig. 2 reveals that the optical power can be linearly varied between almost zero and the maximum value. The drift of the emission wavelength of about $0.16\ \text{nm}$, caused by the self-heating during the increase of the amplifier, is smaller than the spectral acceptance of the chosen PPLN waveguide crystal. Due to these spectral properties and the narrow, current-independent far field divergence (lateral 8° , vertical 20°) the RW-DFB-MOPA is ideally suited for frequency conversion in a PPLN waveguide crystal. The frequency-doubled optical power can easily be controlled via the amplifier current. Assuming a typical conversion efficiency of PPLN waveguide crystals, more than $70\ \text{mW}$ at a wavelength of $530\ \text{nm}$ can be expected.

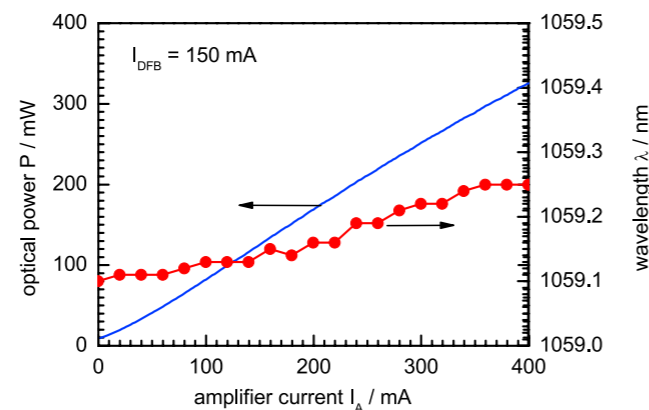


Abb. 2: Optische Ausgangsleistung (linke Achse) und Emissionswellenlänge (rechte Achse) eines DFB-RW-MOPAs als Funktion des Stromes durch den integrierten Verstärker

Fig. 2: Optical output power (left axis) and emission wavelength (right axis) of a DFB-RW-MOPA as a function of the input current to the integrated amplifier

über den Strom durch den Verstärker kontrollieren. Unter Annahme von üblichen Konversionseffizienzen von PPLN-Wellenleiterkristallen ist eine maximale optische Leistung von $>70\ \text{mW}$ bei einer Wellenlänge von $530\ \text{nm}$ zu erwarten. Für grüne Lichtleistungen von mehr als $100\ \text{mW}$ wird zur Frequenzverdopplung eine Pumpquelle benötigt, welche auch bei einer erforderlichen Ausgangsleistung von bis zu $5\ \text{W}$ eine sehr gute Wellenlängenstabilität und Strahlqualität aufweist. Der dafür am FBH entwickelte DBR-Trapez Laser besteht aus einer geraden RW-Sektion und einer sogenannten Trapez-Sektion mit einem Kontakt, der sich in Richtung der Lichtaustrittsfacetten aufweitet. Die RW-Sektion wird an der rückwärtigen Facette durch einen wellen-

For a green light power of more than $100\ \text{mW}$ a pump source is needed, which delivers an output power of up to $5\ \text{W}$ combined with an excellent wavelength stability and beam quality. The DBR tapered laser, developed at the FBH for this purpose, consists of a straight RW section and a so-called tapered section which has a contact flared towards the front facet. The RW section is terminated by a wavelength-selective reflector (distributed Bragg reflector, DBR) at the rear facet. The Bragg grating of the reflector with a period of approx. $1\ \mu\text{m}$ (fig. 3) is introduced into the epitaxial layer structure from the surface of an almost completely processed semiconductor wafer. For this purpose the much more

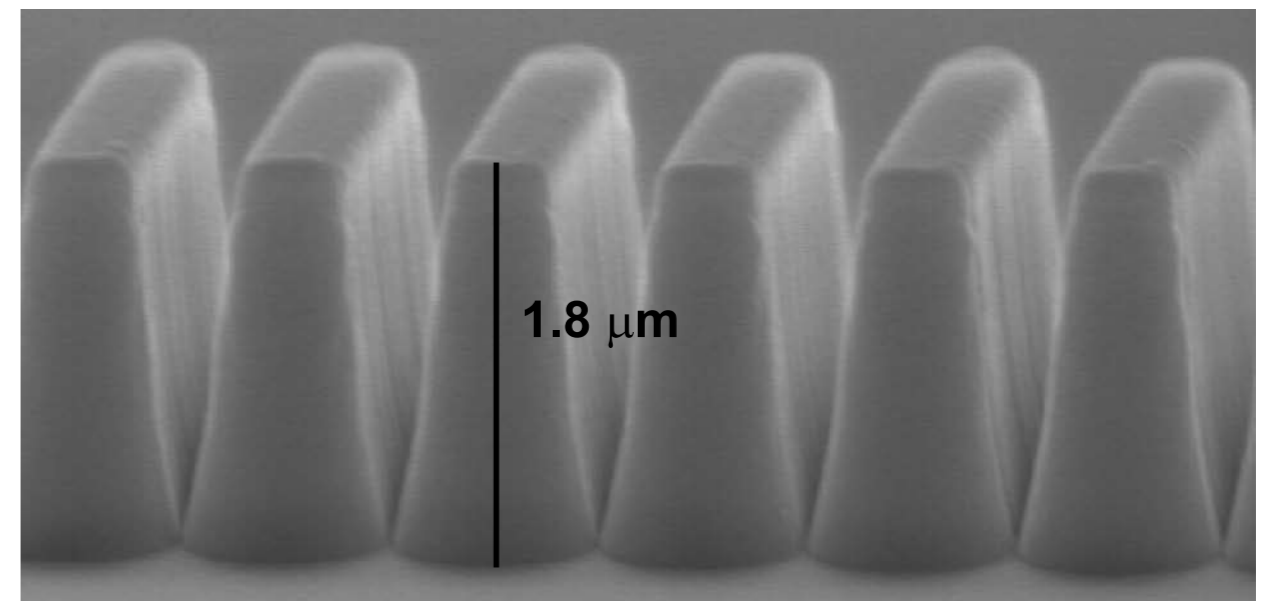


Abb. 3: Rasterelektronen-Mikroskopaufnahme eines Oberflächen-Bragg-Reflektors

längen-selektiven Reflektor (Distributed Bragg Reflector, DBR) begrenzt. Das Bragg-Gitter des Reflektors mit einer Periode von ca. $1\ \mu\text{m}$ (Abb. 3) wird von der Oberfläche des weitgehend prozessierten Halbleiterwafers in die Schichtstruktur eingebracht. Anstelle der aufwändigeren holografischen Fotolithografie wird hierzu die wesentlich produktivere, industriekompatible Projektionslithografie mit einem Waferstepper benutzt. Umfangreiche Simulationen waren notwendig, um das Design des Gitters an das Herstellungsverfahren anzupassen – ohne Abstriche beim Reflexionsvermögen zu machen.

productive, industry-compatible projection lithography using a wafer stepper is applied instead of the more expensive holographic photo lithography. In order to adapt the design of the grating to the manufacturing method and to maintain a high reflectivity at the same time, extensive numerical simulations were performed.

Typische Kennlinien eines DBR-Trapezlasers im Dauerstrichbetrieb sind in Abb. 4 dargestellt. Dabei wurde der Strom durch die Trapezsektion zwischen 0 und 6 A und der Strom durch die RW-Sektion zwischen 0 und 345 mA variiert. Es konnte eine maximale Ausgangsleistung von mehr als 3,5 W erreicht werden. Bei einem Trapezstrom von 1,5 A lässt sich die Ausgangsleistung durch Modulation des Stromes durch die RW-Sektion zwischen 0 und 1 W variieren. Wie Abb. 5 zeigt, ändert sich dabei die Emissionswellenlänge nur um ca. 0,2 nm. Das Ziel der weiteren Optimierung besteht in der Erhöhung der modulierbaren Ausgangsleistung.

Die Laser besitzen eine sehr gute Strahlqualität. Bei einer Leistung von 3,5 W werden mehr als 80% der optischen Leistung aus der zentralen Strahlkeule emittiert. Diese Bauelemente sind exzellent als Pumplichtquellen für eine Frequenzkonversion mit PPLN-Volumenkristallen geeignet. Dies konnte im integrierten europäischen IST-Projekt WWW.BRIGHTER.EU nachgewiesen werden. Bei einer Leistung von 2 W im infraroten Spektralbereich ($\lambda = 1060 \text{ nm}$) konnten vom Projektpartner RISOE-DTU 300 mW grünes Licht ($\lambda = 530 \text{ nm}$) erzeugt werden.

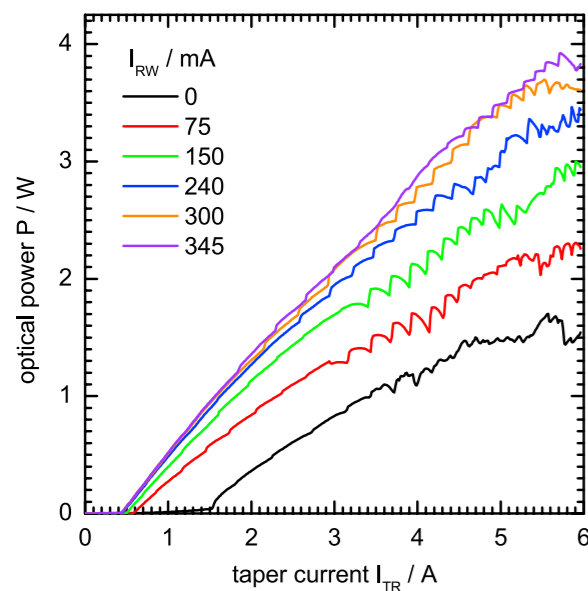


Abb. 4: Optische Ausgangsleistung eines DBR-Trapezlasers als Funktion des Stromes durch die Trapezsektion. Parameter ist der Strom durch die RW-Sektion.

Fig. 4: Optical output power of a DBR tapered laser as function of the input current to the tapered section. Parameter is the input current to the RW section.

In fig. 4 the cw output power of a DBR tapered laser is depicted in dependence of the input current to the tapered section for different input currents to the RW section. A maximum power of more than 3.5 W was achieved for currents of 6 A and 345 mA, respectively. For a input current of 1.5 A to the tapered section the output power can be continuously modulated between 0 and 1 W by varying the input current to the RW section between 0 and 345 mA. Fig. 5 reveals that the emission wavelength changes thereby only by 0.2 nm. A further optimization aims at increasing the maximum output power that can be modulated.

The DBR tapered laser features an excellent beam quality. At a power of 3.5 W more than 80% of the power is emitted within the main power lobe. These devices are ideally suited as pump light source for frequency conversion in PPLN bulk crystals. This was proven within the integrated European IST project WWW.BRIGHTER.EU. 300 mW green light ($\lambda = 530 \text{ nm}$) were demonstrated from 2 W infra-red light ($\lambda = 1060 \text{ nm}$) by the project partner RISOE-DTU.

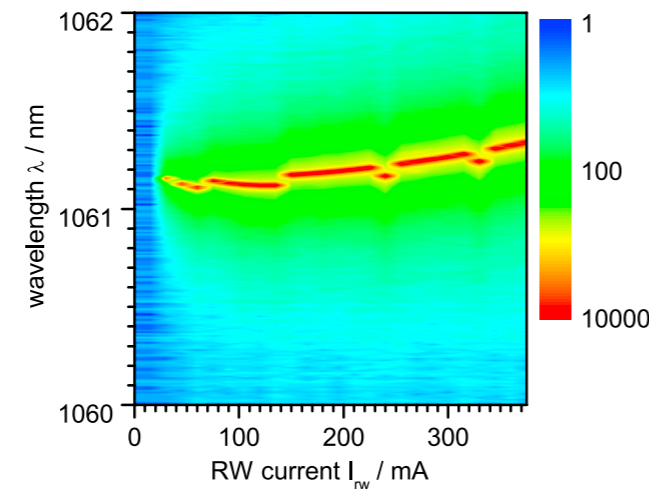


Abb. 5: Falschfarbendarstellung des optischen Spektrums eines DBR-Trapezlasers als Funktion des Stromes durch die RW-Sektion. Der Strom durch die Trapezsektion von $I_{TR} = 1,5 \text{ A}$ wurde konstant gehalten.

Fig. 5: Color-scale plot of the optical spectrum of a DBR tapered laser as function of the input current to the RW section. The input current of 1.5 A to the tapered section was kept constant.

Veröffentlichungen // Publications

O. Brox, J. Wiedmann, F. Scholz, F. Bugge, J. Fricke, A. Klehr, T. Laurent, P. Ressel, H. Wenzel, G. Erbert, G. Tränkle, "Integrated 1060nm MOPA pump source for high-power green light emitters in display technology", Proc. of SPIE Vol. 6909, 69091G. Accepted 2007, published 2008.

Effiziente und kompakte Laserquelle bei einer Wellenlänge von 488 nm und einer Ausgangsleistung von 400 mW

Eine neuartige, kleine, sehr effiziente und langlebige Laserquelle für blaues Licht könnte bald eine Reihe von Anwendungen revolutionieren. Eine Vielzahl von Geräten würden damit deutlich kleiner und auch beweglicher werden, beispielsweise hochbrillante Displays fürs mobile Fernsehen in exzellenter Qualität oder handliche Apparate für die DNA-Analytik. Traditionell werden für die Erzeugung von blauem Laserlicht mit einer Wellenlänge von 488 nm Argon-Ionen-Laser benutzt, in denen das Laserlicht durch eine Gasentladung erzeugt wird. Dieser Lasertyp ist aber mit Wirkungsgraden unter 1% sehr ineffizient, relativ groß und erreicht auch nicht die von den Anwendern gewünschten Lebensdauern.

Eine vielversprechende Methode um hohe Leistungen des blauen Lichtes in einem kompakten Bauteil effizient zu erzeugen, ist die Frequenzkonversion (second harmonic generation, SHG). Dafür hat das FBH einen im nahen infraroten Spektralbereich emittierenden, hocheffizienten, leistungsstarken und hochbrillanten Diodenlaser entwickelt. Er verfügt über eine interne Wellenlängenstabilisierung und hervorragende Strahlqualität. Mit einem DBR Trapezlaser konnten die Anforderungen an eine Laserstrahlquelle für die effiziente Frequenzkonversion erfüllt werden. Gleichzeitig sind die Abmaße dieser Strahlquelle ausreichend klein, um eine spätere Integration auf einer mikrooptischen Bank zu ermöglichen.

Der insgesamt 4 mm lange Trapezlaser besitzt eine 2 mm lange RW (ridge waveguide) Sektion und eine 2 mm lange Trapezsektion. Der volle Öffnungswinkel der Trapezsektion beträgt sechs Grad. Die

Efficient and Compact Laser Source with a Wavelength of 488 nm and an Output Power of 400 mW

Many applications can be revolutionized using novel laser sources for blue light, which have a small form factor, and are very efficient and durable. With it, a huge number of devices could become smaller and even mobile, like highly brilliant displays in excellent quality for mobile TV or handhelds for DNA analytics. Traditionally argon-ion lasers are used to generate blue light at a wavelength of 488 nm. The disadvantages of this laser type are the poor power efficiency, it's big size and the short lifetime. The second harmonic generation (SHG) is a promising method to generate high power of blue laser light much more efficiently in a very compact device. For this reason, the FBH has developed a high-power, high-efficient near infrared diode laser with an excellent beam quality. This in connection with an internal wavelength stabilization results in a very high spectral radiance, which is of paramount importance for efficient SHG.

The DBR tapered laser, developed at the FBH for this purpose, meets all these requirements. Additionally, the small footprint of the device enables its integration on a single micro-optical bench together with the SHG crystal. The tapered laser has a total length of only 4 mm. It consists of two 2 mm sections, a ridge waveguide section (RW) for lateral mode filtering, and a taper section for the high optical output power. The RW section also contains a 1 mm long 6th order surface grating. The grating was implemented using an I-line wafer stepper. The laser chip was mounted p-side up on the heat sink allowing individual drive currents through the RW and taper sections.

RW-Sektion hat zur Modenfilterung ein 1 mm langes Oberflächengitter sechster Ordnung, welches mit einem I-line Wafer Stepper hergestellt wurde. Der Laserchip wurde mit der p-dotierten Seite nach oben auf einen CCP-Halter montiert. Das erlaubt eine getrennte Ansteuerung des Stromes für die RW- und die Trapezsektion. In Abb. 1 ist die Kennlinie eines DBR-Trapezlasers bei 15°C zu sehen, für einen RW-Strom von $I_{RW} = 300$ mA. An der rechten Achse ist die Ausgangsleistung des Lasers und an der linken Achse die Effizienz über den Trapezstrom dargestellt. In Abb. 2 ist das Spektrum bei maximaler Leistung zu sehen. Über den gesamten gemessenen Bereich ist ein longitudinal monomodiges Spektrum bei ca. 977 nm erreicht worden. Das Spektrum wurde mit einer Lorentzkurve approximiert und daraus konnte eine Halbwertsbreite von 12 pm ermittelt werden.

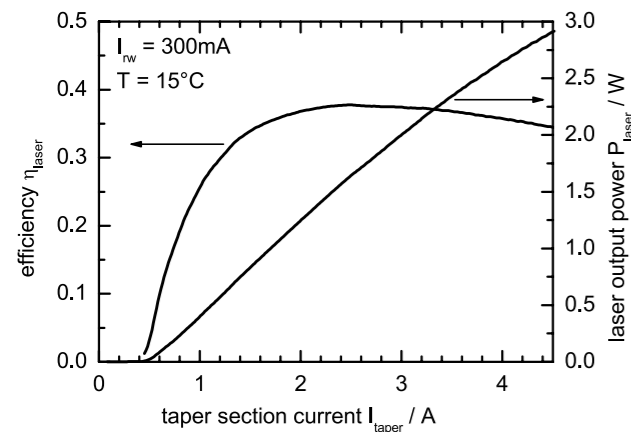


Abb. 1: Optische Laserleistung P_{laser} (rechte Achse) und Effizienz η (linke Achse) aufgetragen über den Pumpstrom I_{taper} durch die Trapezsektion
Fig. 1: Optical laser power P_{laser} (right axis) and efficiency η (left axis) versus pump current I_{taper} of the tapered section

Um das Potential dieses Diodenlasers in Bezug auf die Frequenzkonversion zu demonstrieren, wurde ein makroskopischer Aufbau realisiert, der schematisch in Abb. 3 zu sehen ist. Der Strahl der Laserquelle wurde durch ein optisches System geleitet (L1 - L4), welches für eine maximale SHG-Leistung optimiert wurde. Der optische Isolator ist notwendig um Rückreflexionen in den DBR-Trapezlasers zu vermeiden.

Für die Frequenzkonversion wurde ein periodisch gepolter LiNbO₃ (PPLN) Kristall benutzt. Die Dimensionen für die Länge, Höhe und Breite sind 50 x 2 x 0,5 mm³. Die spektrale Akzeptanz eines solchen Kristalls liegt bei $\Delta\lambda_{PPLN} = 24$ pm. Der Kristall konnte effizient genutzt werden, da die spektrale

Fig. 1 shows the efficiency (left axis) and the light-current (right axis) characteristics of the DBR tapered laser at 15°C and a RW current of $I_{RW} = 300$ mA. The spectrum at the maximum power of 2.8 W is shown in fig. 2 (squares). The laser showed single mode behavior over the whole range of the taper current. The spectrum was fitted with a Lorentzian (curve) resulting a full width at half maximum (FWHM) of less than 12 pm.

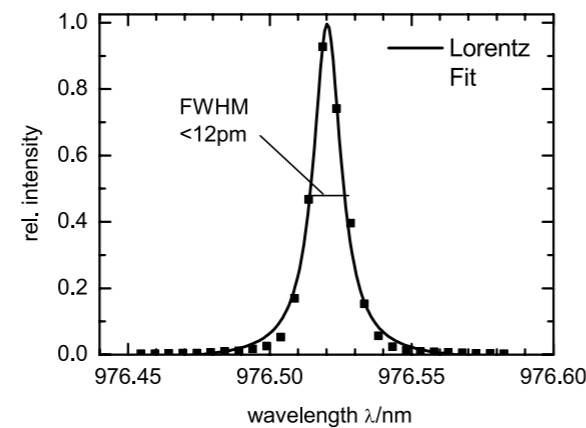


Abb. 2: Spektrum bei maximaler Leistung
Fig. 2: Spectrum at maximum power

In order to show the potential of these lasers for SHG, a macroscopic experiment was carried out, as schematically shown in fig. 3. The beam was propagated through an optical system (L1 - L4) to maximize the SHG conversion efficiency in the crystal. An optical isolator was used to suppress the light from reflections at the crystal's surface.

For the SHG a periodically poled LiNbO₃ (PPLN) crystal was used, which had a size of 50 x 2 x 0.2 mm³. The length of the crystal of 50 mm resulted in a spectral acceptance of $\Delta\lambda_{PPLN} = 24$ pm. An efficient SHG could be achieved, because the FWHM of the laser (<12 pm) was lower than the spectral acceptance

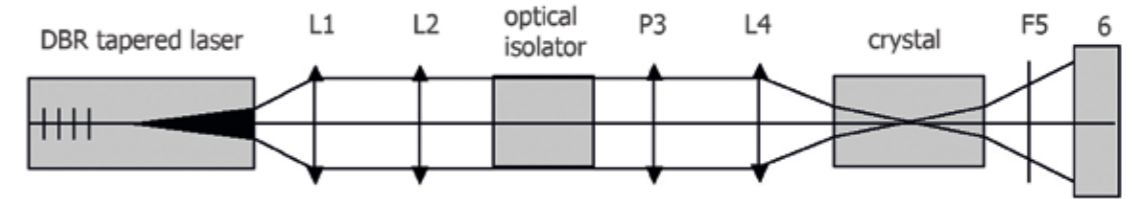


Abb. 3: Aufbau des SHG-Experimentes: DBR-Trapezlasers auf CCP, asphärische Linse L1, Zylinderlinse L2, optischer Isolator, Polarisationsrotator P3, Fokusslinse L4, PPLN Kristall, Kurzpassfilter F5, optischer Leistungsmesser 6
Fig. 3: Schematic of the experimental setup: DBR tapered laser on CCP, aspheric lens L1, cylindrical lens L2, optical isolator, polarisation rotator P3, focus lens L4, PPLN crystal, short-pass filter F5, optical power meter 6

Halbwertsbreite des Lasers mit $\Delta\lambda_{DBR\ laser} < 12$ pm kleiner war als die Akzeptanzbreite des Kristalls. Der PPLN-Kristall wurde in einem Ofen geheizt um die Phasenanpassungstemperatur genau kontrollieren zu können, z.B. ($51,4 \pm 0,1$)°C bei 976,53 nm.

Die SHG-Leistung P_{out} wurde als Funktion der optischen Pumpleistung P_{pump} gemessen. Diese ist in der Abb. 4 dargestellt. Es gibt einen quadratischen Zusammenhang zwischen der optischen Pumpleistung P_{pump} und der SHG-Leistung P_{out} . Die gute Strahlqualität und die hohe Ausgangsleistung des Lasers führten zu einer blauen Lichtleistung von mehr als 400 mW und einer maximalen Konversionseffizienz von 16,5% bei einer Pumpleistung von $P_{pump} = 2,45$ W. Das Spektrum des blauen Lichts bei dieser Leistung ist in Abb. 5 gezeigt. Die Gesamteffizienz liegt dann bei 5 %, deutlich höher als bei einem Argon-Ionen-Laser. Der kompakte Aufbau auf einer mikrooptischen Bank wird diesem Lasertyp zudem viele Anwendungen öffnen.

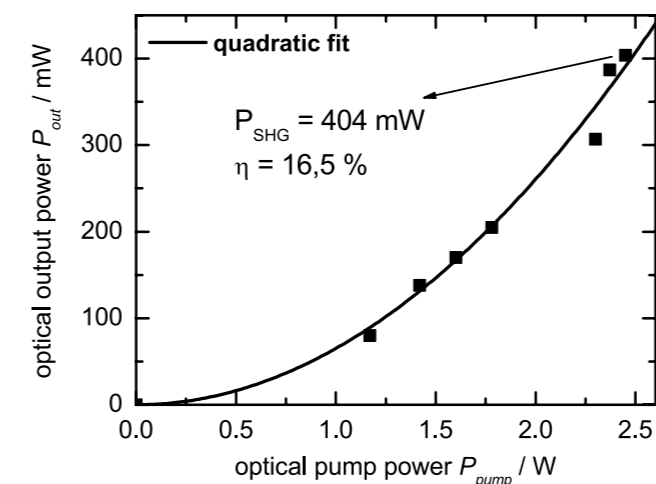


Abb. 4: Optische SHG-Leistung P_{out} als Funktion der Pumpleistung P_{pump}
Fig. 4: Optical SHG power P_{out} as function of the pump power P_{pump}

of the crystal. In order to match the emission of the laser with the acceptance wavelength of the PPLN crystal (phase-match) was heated in an oven, e.g. to 51.4 ± 0.1 °C at 976.53 nm.

The resulting SHG output power P_{out} as a function of the pump power P_{pump} is displayed in fig. 4 (squares), and one observes a quadratic dependence (curve). The good beam quality and the high output power result in a SHG output power of more than 400 mW and a maximum conversion efficiency of 16.5% at a pump power of $P_{pump} = 2.45$ W. The spectrum of the SHG at maximum power is shown in fig. 5. The overall efficiency of about 5% is significantly higher than of any argon-ion laser, and the compact nature of the diode laser will enable many new applications when used in a micro-optical bench.

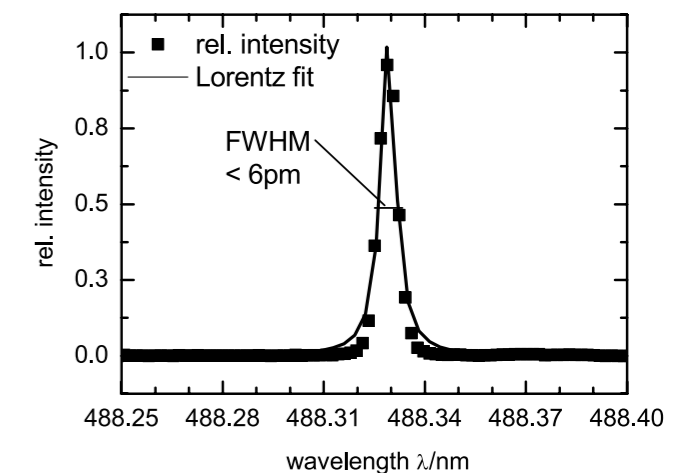


Abb. 5: Spektrum des frequenzkonvertierten Lichts bei 400 mW
Fig. 5: Spectrum of the frequency converted light at 400 mW

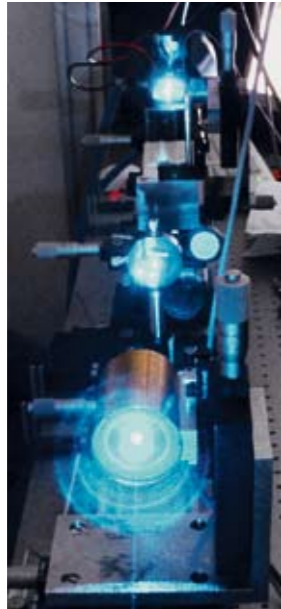


Abb. 6: Versuchsaufbau
Fig. 6: Experimental set-up

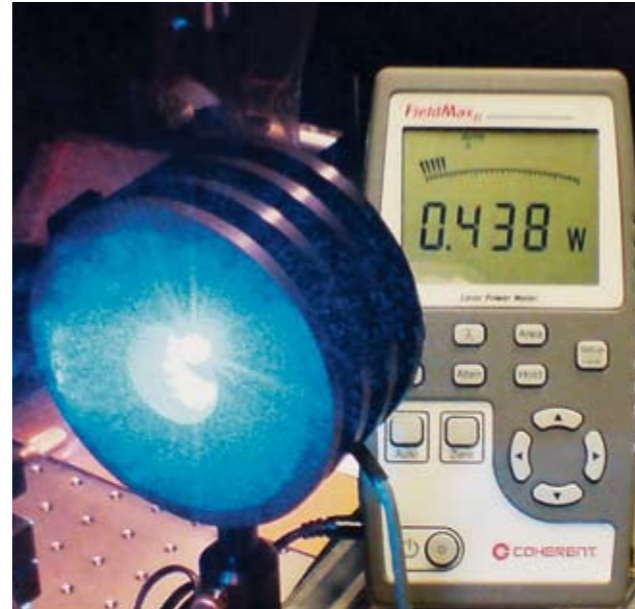


Abb. 7: Leistungsmessung von P_{out}
Fig. 7: Power measurement of P_{out}

Veröffentlichungen // Publications

G. Blume, M. Uebernickel, C. Fiebig, K. Paschke, A. Ginolas, B. Eppich, R. Güther, G. Erbert, "Rayleigh length dependent SHG conversion at 488 nm using a monolithic DBR tapered diode laser", presented at the Photonics West, San José, California. Accepted September 2007, published January 2008.

Wellenlängenstabilisierte, kompakte 671 nm Diodenlaserslichtquelle hoher Leistung auf einer mikrooptischen Bank für die in-situ Raman-Spektroskopie

Genießbar oder verdorben? Das würden Verbraucher beim Lebensmitteleinkauf im Supermarkt gerne genau wissen. Diese Vision könnte, dank der neuen FBH-Laserlichtquellen, bald wahr werden.

Für die spektroskopische Lebensmittelanalytik aber auch die Lasersensorik mit ihrem breiten Anwendungsspektrum, werden oft Wellenlängen und spektrale Linienbreiten benötigt, die gegenwärtig nicht direkt mit einem Halbleiterlaser erzeugt werden können. So wird für die Raman-Spektroskopie von biologischen Proben (z. B. Fleisch) eine Anregungslichtquelle mit einer stabilen Emissionswellenlänge von ca. 671 nm und einer spektralen Breite kleiner als 0,5 nm ($\Delta\tilde{\nu} \approx 10 \text{ cm}^{-1}$) benötigt. Letzterer Wert ergibt sich aus der typischen Strukturbreite der zu vermessenden Signaturen.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten wissenschaftlichen Vorprojektes "FreshScan" 16SV2332 wurde eine für die in-situ Raman-Spektroskopie geeignete Anregungslichtquelle realisiert, mit deren Hilfe der Qualitätszustand von Fleisch überwacht werden soll. Abb. 1 zeigt die entwickelte Laserlichtquelle im Betrieb. Hierbei wird ein rückseitig entspiegelter Breitstreifenlaser als aktives Medium verwendet. Auf einer

Microsystem Technology Based High-Power Wavelength-Stabilized 671 nm Diode Laser Light Source for the In Situ Raman Spectroscopy

Eatable or spoiled? This is what customers would like to know thoroughly when buying food in the supermarket. This vision could soon become true, thanks to novel light sources developed at the FBH.

For the spectroscopic analysis of food and many other application fields of laser sensors, light sources are often requested at certain wavelengths with a small spectral line width. Up to now, these properties are not directly available by using a semiconductor laser. For the Raman spectroscopy of biological samples (e.g. meat) a laser source at a stable wavelength of about 671 nm together with a spectral width below 0.5 nm ($\Delta\tilde{\nu} \approx 10 \text{ cm}^{-1}$) is necessary. The latter value comes from the typical spectral width of the measured spectra.

Within the scientific pre-project "FreshScan", supported by the BMBF, an excitation light source suitable for the in situ Raman spectroscopy was developed. This light source is implemented into a compact measuring system for the observation of meat quality. Fig. 1 shows the laser light source in operation. The compact external cavity laser system is placed on a micro-optical bench with a length of 13 mm and a width of 4 mm. As gain medium a broad area laser

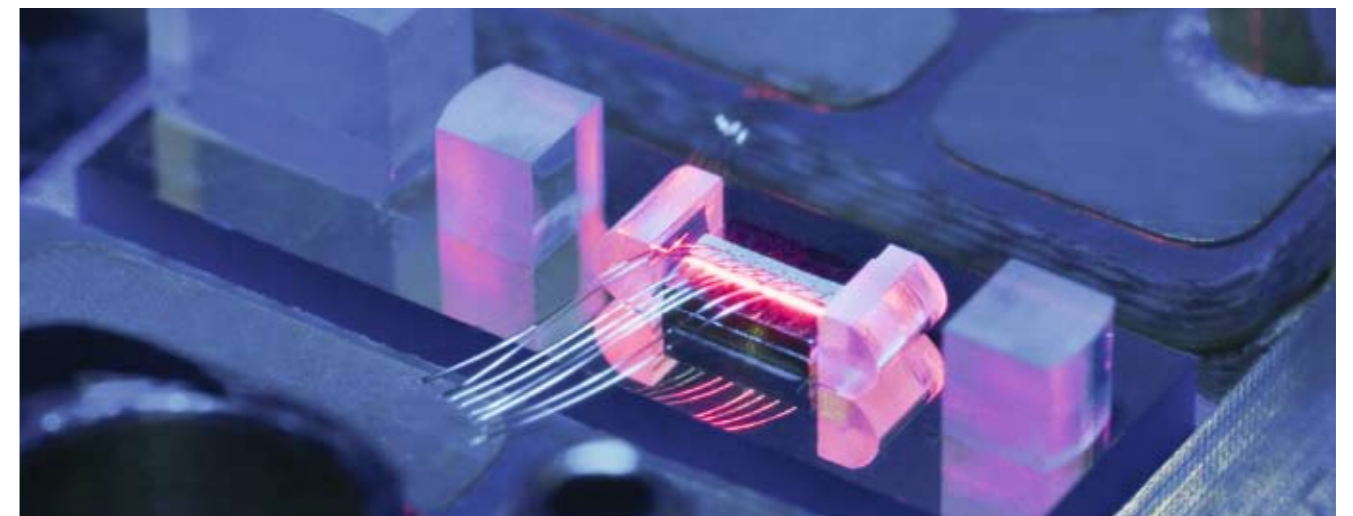


Abb. 1: Mikrosystemlichtquelle @ 671 nm im Betrieb
Fig. 1: Microsystem light source at 671 nm

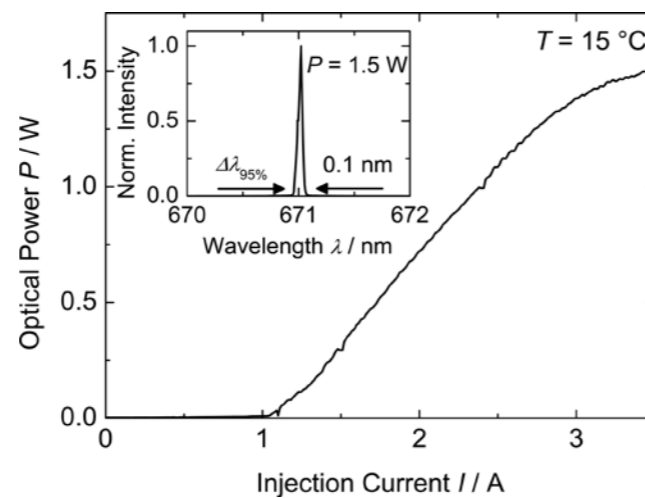
mikrooptischen Bank einer Basislänge von 13 mm und einer Breite von 4 mm ist ein Laser System in externer Kavität realisiert worden. Auf diese Bank werden Mikrooptiken zur Strahlformung und ein Reflexions-Bragg-Gitter zur Wellenlängenstabilisierung integriert. Aufgrund hoher Justageanforderungen mit Toleranzen von ca. $\pm 1 \mu\text{m}$ wurde eine Vorrichtung zur Montage der Mikrooptiken entwickelt. Diese ermöglicht den reproduzierbaren Aufbau effizienter Mikrosystemlichtquellen, deren Mikrooptiken im Sub-Mikrometer-Bereich fixiert werden.

In Abb. 2 ist die optische Ausgangsleistung einer Mikrosystemlichtquelle mit einem Gewinnmedium mit $100 \mu\text{m}$ Streifenbreite in Abhängigkeit vom Injektionsstrom aufgezeigt. Bei einem Injektionsstrom von 3,5 A erreicht das Lasersystem eine optische Leistung von 1,5 W, die für großflächige Anregungen geeignet ist. Wie das in die Abbildung eingefügte optische Spektrum zeigt, besitzt der Laser selbst bei dieser hohen Ausgangsleistung bei Emissionswellenlänge von 671,0 nm eine spektrale Breite von nur 100 pm ($\Delta\tilde{\nu} = 2 \text{ cm}^{-1}$), in der sich 95% der optischen Leistung befinden. Die Effizienz dieser Lichtquelle liegt mit etwa 20% nur geringfügig unter denen von Fabry-Perot-Breitstreifenlasern gleichen Aufbaus.

Abb. 2: Optische Ausgangsleistung in Abhängigkeit vom Injektionsstrom, optisches Spektrum bei $P = 1,5 \text{ W}$
 Fig. 2: Power-current characteristic for a microsystem light source with $100 \mu\text{m}$ gain medium together with the optical spectrum at $P = 1.5 \text{ W}$

is used. The rear facet of the device is highly anti-reflection coated. At this side, micro lenses are used for beam shaping towards a reflection Bragg-grating. This grating forms the second resonator mirror and ensures wavelength stabilization and line width narrowing. For the necessary precise adjustment in the sub-micrometer range, a customized set-up was developed.

Fig. 2 shows the optical output power of such a device as function of the injection current. In this case a broad area device with a stripe width of $100 \mu\text{m}$ was used as gain medium. At an injection current of 3.5 A, an optical output power of 1.5 W was measured. As shown in the inset, even at this high output power the emission width (95% power included) at 671 nm is about 100 pm ($\Delta\tilde{\nu} = 2 \text{ cm}^{-1}$). The efficiency of this light source is about 20% and herewith comparable to Fabry-Perot broad area lasers mounted in a similar way.



In Abb. 3 ist das Spektrum der Mikrosystemlichtquelle in Abhängigkeit vom Anregungsstrom zu sehen. Der Schwerpunkt der Emission verschiebt sich um nur 70 pm.

Das realisierte Bauelement ist auch über größere Zeiträume stabil. Die Abb. 4 zeigt, dass über einen Zeitraum von 5,5 h die Schwerpunktswellenlänge nur um $\pm 8 \text{ pm}$ schwankt.

Messungen mit dieser Lichtquelle am Institut für Optik und Atomare Physik an der Technischen Universität Berlin zeigen ihre Eignung für die in-situ Raman-Spektroskopie.

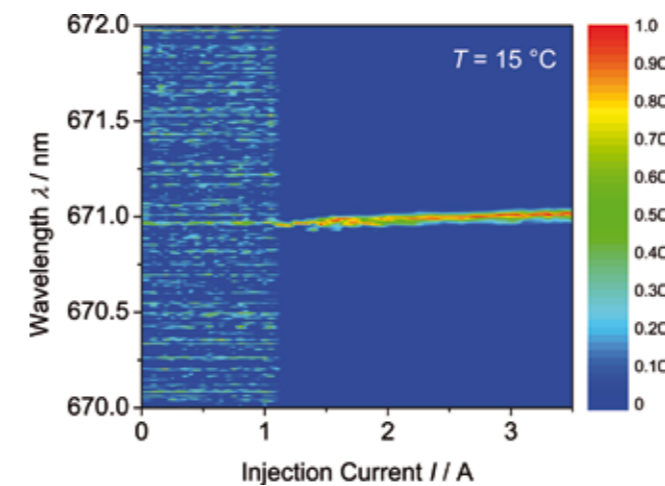


Abb. 3: Spektrum Map bei einer Temperatur $T = 15^\circ\text{C}$ für den Mikrobank-Laser
 Fig. 3: Optical spectra of the microsystem light source at $T = 15^\circ$

In fig. 3 the emission spectrum of the microsystem light source as function of the injection current is given. It can be seen that the center wavelength is stable within 70 pm. Independently from the current (the emitted power), the wavelength meets the requirements for Raman spectroscopy.

The wavelength stability over 5.5 h is given in fig. 4. It can be seen, that the center wavelength only changes for $\pm 8 \text{ pm}$. This is suitable for a calibration-free measurement over larger periods.

Such light sources were successfully tested for the in situ Raman spectroscopy at the Institute for Optics and Atomic Physics at the Technical University Berlin.

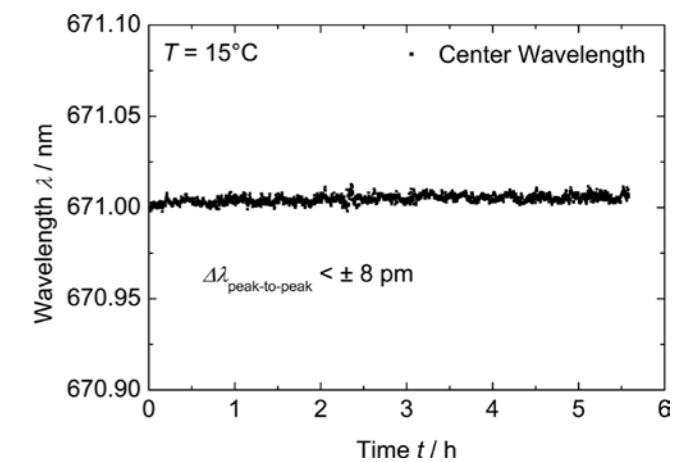
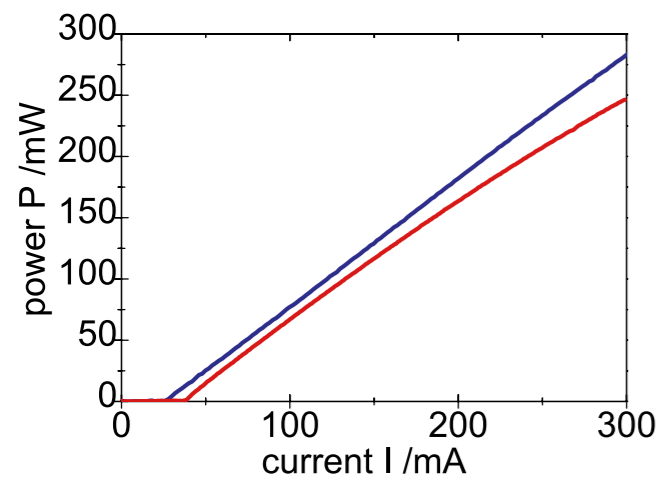


Abb. 4: Wellenlängenstabilität über einen Zeitraum von 5,5 h bei $P = 1 \text{ W}$ und $T = 15^\circ\text{C}$
 Fig. 4: Wavelength stability at $P = 1 \text{ W}$ and $T = 15^\circ\text{C}$ over 5.5 h

Distributed-Feedback-Laser (DFB) für Atomuhren auf der Basis von Cäsiumübergängen

Atomuhren liefern die Referenzzeit für die Steuerung von Funkuhren. Sie gewährleisten die präzise, automatische Zeiteinstellung – daher brauchen sich auch Besitzer von Funkweckern nicht mehr um die Zeitumstellung zu kümmern. Im GPS, dem Global Positioning System, bei wissenschaftlichen Grundlagenuntersuchungen und speziellen Experimenten im Weltraum werden Atomuhren als genaue Zeitgeber eingesetzt. Dabei wird die Eigenschaft von Atomen genutzt, dass beim Übergang zwischen zwei Energiezuständen elektromagnetische Wellen mit einer charakteristischen Frequenz abgestrahlt werden. Um diese Uhren noch genauer, stabiler, kleiner und langlebiger zu realisieren, entwickeln Wissenschaftler am FBH einfache, kompakte Einmoden-Laserdioden. Diese können sowohl in Atomuhren als auch Atommagnetometern, Interferometern, LIDAR-Systemen sowie in speziellen hochpräzisen Geräten für wissenschaftliche Experimente eingesetzt werden.

Diese Anwendungen benötigen eine hohe Ausgangsleistung der Emissionsstrahlung, eine stabile Wellenlänge mit geringer Linienbreite und die Möglichkeit die Laserlinie einfach, schnell und präzise zu verschieben. Ziel der Arbeiten zur Verbesserung der Atomuhren ist es, die Größe, das Gewicht und die benötigte Leistungsaufnahme zu reduzieren und die Lebensdauer zu erhöhen. Laserdioden mit integriertem Gitter zur Wellenlängenstabilisierung wie z. B. Laser mit verteilter Rückkopplung DFB-Laser oder Distributed-Bragg-Reflector-Laser (DBR) können diese Anforderungen erreichen.



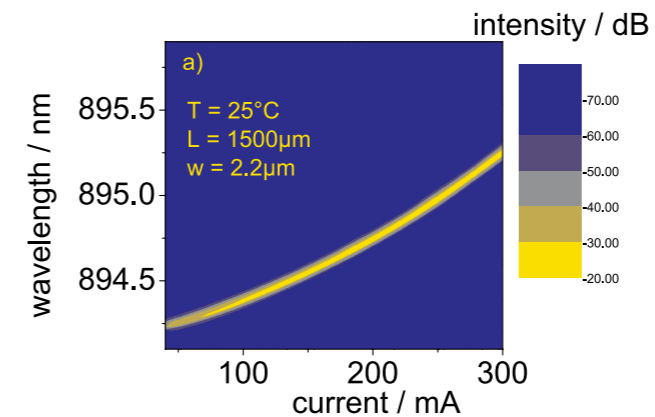
Distributed Feedback (DFB) Laser for Atomic Clocks Based on Caesium Transitions

Atomic clocks deliver the reference time for radio clocks all over the country. They ensure precise and automatic time adjustment – that is why owners of radio-controlled alarm clocks do not need to bother about clock change according to daylight saving time. Additionally, atomic clocks operate as timer for the global positioning system (GPS) and are essential components for time investigations in basic research as well as in equipment for space applications. They operate with highly stable frequency standards caused by transitions between atomic energy levels. In order to make them even more precise, robust, long-living and smaller, FBH researches on simple, robust, and single-mode operating diode lasers, used in e.g. atomic clocks, atomic magnetometers, interferometers, LIDARs and others.

These applications require high output power, a stable lasing wavelength with a small spectral line width and the ability to simply, quickly and precisely tune the wavelength. These properties are essential for the implementation of laser diodes in high-precision instrumentation as well as in high-quality scientific experiments. Thus, objectives are to improve clock stability, to reduce size, weight and power consumption as well as to increase lifetime and reliability. Atomic clock systems can be based on different quantum transitions, and on different types of atoms, such as, Caesium (Cs) or Rubidium (Rb). Solitary operating diode lasers with integrated spectral control, such as Distributed Feedback (DFB) or Distributed Bragg Reflector (DBR) lasers fit precisely to these demands.

Abb.1: Leistungs-Gleichstrom-Kennlinie bei 25°C Wärmesenktemperatur für einen 852 nm (blau) und 894 nm DFB-Laser (rot)
Fig. 1: Cw L-I characteristic at 25°C heat sink temperature for a 852 nm (blue) and for a 894 nm laser (red)

Atomuhren können mit unterschiedlichen Elementen wie z. B. Caesium oder Rubidium realisiert werden. Im FBH wurden schmalbandige Hochleistungs-DFB-Laserdioden für die Wellenlängen 852 nm (D2-Caesiumübergang) und 894 nm (D1-Caesiumübergang) entwickelt. Die Leistungs-Gleichstrom-Kennlinien (L-I) dieser Laser bei einer Wärmesenktemperatur von 25°C zeigt Abb. 1. Der Schwellstrom ist unter 50 mA. Der Anstieg für beide Lasertypen ist etwa 1 W/A. Diese gute Effizienz wurde durch einen geringen Koppelkoeffizienten des integrierten Gitters erreicht. Bei 300 mA Anregungsstrom ist die Laserleistung mehr als 250 mW. Ein Beispiel für die optischen Eigenschaften eines 894 nm DFB Lasers ist in Abb. 2 gezeigt.



Therefore, FBH develops high-power single frequency DFB diode lasers emitting at wavelengths of 852 nm and 894 nm using the Caesium D2 and D1 lines. Continuous wave (cw) optical power versus injection current characteristics (L-I) at a heat sink temperature of T = 25°C are shown in fig. 1. The threshold current is below 50 mA. Slope efficiency for both devices is nearly 1 W/A. This high efficiency is the result of the small coupling coefficient κ of the Bragg grating. At a current of 300 mA an output power of more than 250 mW is achieved. An example for the optical behavior of the 894 nm DFB lasers is shown in fig. 2.

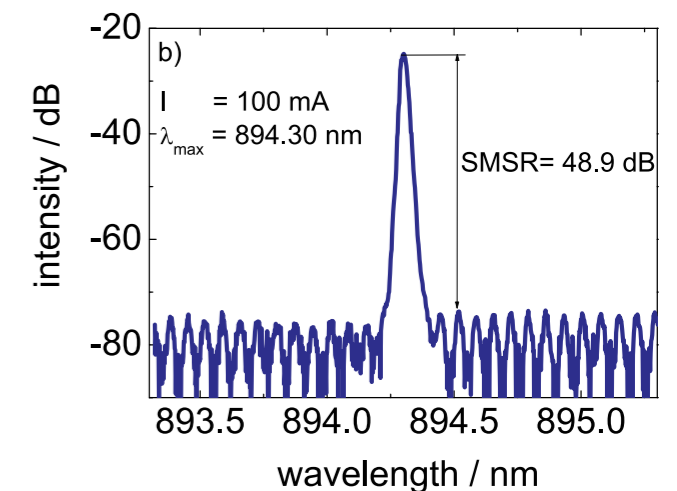
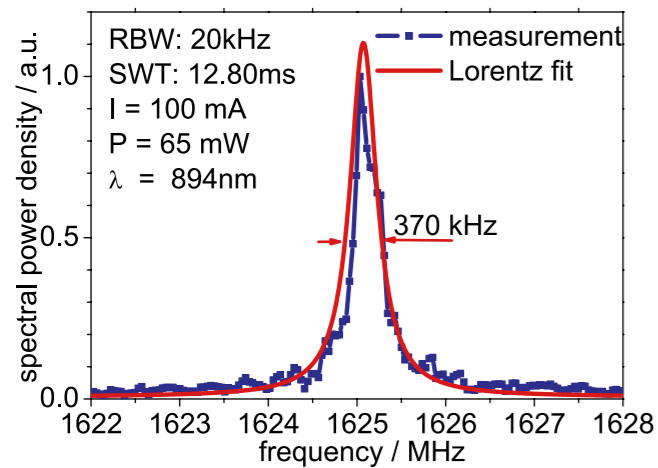


Abb. 2: Optische Spektren in Abhängigkeit vom Anregungsstrom (bei 1 mA Stromvariation) für einen 894 nm DFB-Laser (2a) und longitudinales Modenspektrum bei 100 mA (2b)
Fig. 2: Mapping of the optical spectrum of a 894 nm DFB laser (2a) with a current step of 1 mA and the longitudinal mode spectrum at 100 mA (2b)

Im untersuchten Strombereich von 50 mA bis 300 mA erkennt man eine stabile Laserlinie ohne Modensprung. Die Seitenmodenunterdrückung (SMSR) ist ~ 50 dB. Die beobachtete geringe Verschiebung der Laserlinie mit dem Anregungsstrom kann durch die Änderung des Brechungsindex mit der Temperatur erklärt werden. Die Breite der Laserlinie wurde durch Messung der Differenzfrequenz der Laseremission von zwei gleichen DFB-Lasern ermittelt. Abb. 3 zeigt die gemessene Differenzfrequenz von zwei 894 nm DFB-Lasern bei 60 mW Ausgangsleistung. Die Halbwertsbreite (FWHM) eines Lorentz-Fits (rote Kurve) ergibt einen Wert von 370 kHz. Im gesamten untersuchten Strombereich war die Halbwertsbreite der Laserlinie kleiner 500 kHz.

Stable single longitudinal mode operation with a smooth shift of the emission wavelength without any mode hopping can be observed within the investigated current range from 50 mA to 300 mA. Variation of the lasing wavelength with injection current is caused by temperature induced change of refractive indices. Side mode suppression ratio (SMSR) is around 50 dB. The emission line width is determined from beatnode signal of two DFB lasers. Fig. 3 shows the beatnode signal of 894 nm DFB lasers measured at a power of 60 mW. The full width half maximum (FWHM) of the Lorentzian fit (red curve) is 370 kHz. Line width is found to be less than 500 kHz over the full range of injection current tested, which makes the laser well-suited for selective excitation of different hyperfine

Da die natürliche Linienbreite von Caesium ~ 6 MHz ist, sind die Laser sehr gut für eine selektive Anregung der Energiezustände von Caesiumübergängen für den Einsatz in Atomuhren geeignet. Um dieses zu überprüfen, wurde der Laserstrahl eines 894 nm DFB-Lasers durch eine 80 cm lange Caesium-Zelle gestrahlt und die Leistung mit einer Fotodiode detektiert. Dabei wurde die Wellenlänge der Laserlinie durch Änderung des Anregungsstromes in Schritten von 0,1 mA verschoben. Die gemessene Leistungs-Strom Kennlinie bei 25,5°C zeigt Abb. 4.



components on the Cs transitions in an atomic beam (natural transition width ≈ 6 MHz), as required in Cs atomic beam frequency standards. In order to verify this, the output beam from the 894 nm DFB laser was collimated and passed through a 80 mm long Caesium vapor cell and detected with a photodiode. The wavelength of the lasing emission is tuned by increasing the injection current in steps of 0.1 mA. The measured power-current characteristic at 25.5°C is shown in fig. 4.

Abb. 3: Mit einem Hochfrequenz-Spektrenanalysator gemessene Differenzfrequenz von zwei gleichen DFB-Lasern bei 100 mA (~ 60 mW). Die Halbwertsbreite des Lorentz-Fits ist 370 kHz.
Fig. 3: Beat spectrum of two identical DFB lasers measured at 100 mA (~ 60 mW) recorded with a high frequency spectrum analyzer. The full width half maximum is 370 kHz.

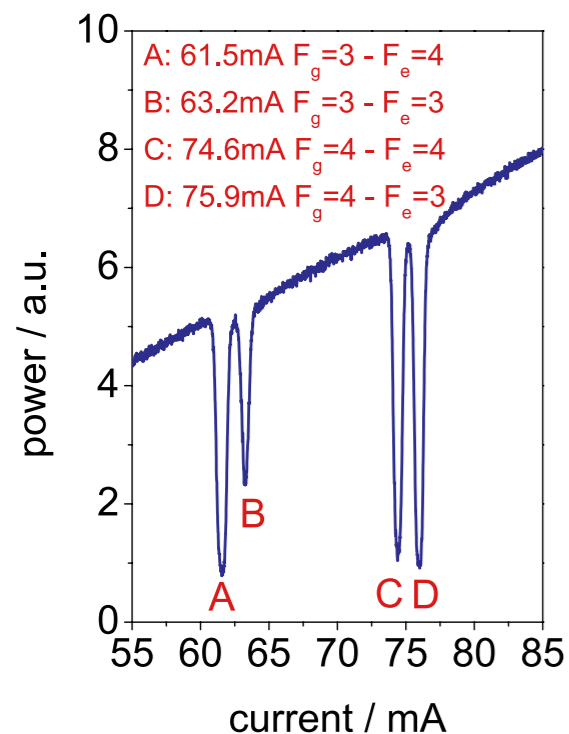


Abb. 4: Durch eine 80 mm lange Caesium-Zelle gemessene Leistungs-Strom Kennlinie eines 894 nm DFB-Lasers bei 25,5°C im Strombereich 55 - 85 mA.
Fig. 4: Power-current characteristic of the 894 nm DFB laser at 25.5°C in the current range 55 - 85 mA measured through a 80 mm long Caesium cell

Man erkennt zwischen 60 mA und 80 mA vier Absorptionslinien, die mit den Übergängen der Hyperfeinstruktur der Caesium-D1-Linien übereinstimmen. Bei 61,5 mA ist der $F_g=3 - F_e=4$ Übergang, bei 63,2 mA der $F_g=3 - F_e=3$ Übergang, bei 74,6 mA der $F_g=4 - F_e=4$ Übergang und bei 75,9 mA der $F_g=4 - F_e=3$ Übergang. Der Frequenzabstand zwischen den Absorptionslinien bei 61,5 mA und 74,6 mA ist 9192,6 MHz und zwischen 74,6 mA und 75,9 mA 1167,7 MHz. Stromänderungen sind mit einer Änderung der Laserleistung und der Wellenlänge verbunden. Die Laserwellenlänge kann aber auch mit der Temperatur verschoben werden. Durch die Änderung beider Parameter kann die Wellenlänge auf die D1-Linie im Leistungsbereich zwischen 10 mW und 250 mW eingestellt werden.

Am FBH konnten kompakte DFB-Laserdioden mit geringer Größe, geringem Gewicht, geringer Leistungsaufnahme und großer Ausbeute realisiert werden. Diese Laser sind durch ihre speziellen Eigenschaften sehr gut für Anwendungen in der Absorptionsspektroskopie der D1- und D2-Übergänge und für den Einsatz in Atomuhren geeignet.

Between 60 mA and 80 mA four absorption peaks can be seen corresponding to the hyperfine structure of the Caesium D1 line. The peaks correlate at 61.5 mA to the $F_g=3 - F_e=4$ transition, at 63.2 mA to the $F_g=3 - F_e=3$ transition, at 74.6 mA to the $F_g=4 - F_e=4$ transition and at 75.9 mA to the $F_g=4 - F_e=3$ transition. The frequency distance between the absorption peaks at 61.5 mA and 74.6 mA is 9192.6 MHz and between 74.6 mA and 75.9 mA 1167.7 MHz. Change of current is related to the change of output power. However, the wavelength can also be tuned by varying heatsink temperature. Combining both tuning parameters allows an adjustment of output power to any desired value between 10 mW and 250 mW at the D1 absorption line.

FBH's research results on DFB lasers demonstrate their easy handling, compactness, reduced size and weight as well as their low power consumption and high yield. These properties make them perfectly suitable for absorption spectroscopy of the Caesium D1 and D2 lines and for atomic clocks.



Abb. 5: Messplatz zur Bestimmung der Linienbreite
Fig. 5: Experimental set-up for examination of line width

Veröffentlichungen // Publications

A. Klehr, H. Wenzel, O. Brox, F. Bugge, G. Erbert, T-P. Nguyen, G. Tränkle, "High-power 894 nm monolithic distributed-feedback laser", Optics Express, vol. 15, no. 18, pp. 11364-11369, 2007.

A. Klehr, H. Wenzel, O. Brox, F. Bugge, G. Erbert, T-P. Nguyen, G. Tränkle, "High power DFB lasers for D1 and D2 caesium absorption spectroscopy and atomic clocks", Proc. of SPIE Vol. 6909, 69091. Submitted 2007, published 2008.

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

Mikrowellenkomponenten und -systeme
Microwave Components and Systems

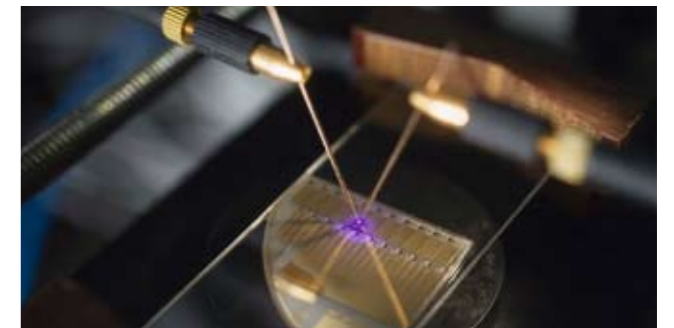
GaN-Elektronik
GaN Electronics

Diodenlaser
Diode Lasers

GaN-Optoelektronik
GaN Optoelectronics

Materialien und Prozesse
Materials and Processes

Netzwerke
Networks



GaN-Optoelektronik

GaN Optoelectronics

InGaN-Multiquantenfilm-Diodenlaser auf Saphir- und GaN-Substraten

InGaN MQW Laser Diodes on Sapphire and Bulk GaN Substrates

Im Geschäftsbereich GaN-Optoelektronik zielen die Arbeiten auf die Entwicklung innovativer Lichtquellen, die auf den Gruppe-III-Nitriden basieren. Eine der einzigartigen Eigenschaften des AlN-GaN-InN-Materialsystems ist, dass es einen extrem breiten Wellenlängenbereich abdeckt. Dieser umfasst das komplette sichtbare Wellenlängenspektrum und reicht vom fernen Ultraviolett (UV) bis ins nahe Infrarot. Diese Eigenschaft macht InAlGaN-Bauelemente für eine Vielzahl neuer Anwendungen überaus interessant. 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.

Zu den Forschungsarbeiten im Bereich GaN-Optoelektronik gehören die Modellierung und Simulation von GaN-Heterostrukturen und Bauelementen sowie die metallorganische Gasphasen-Epitaxie (MOVPE) von InAlGaN-Materialien. Die Arbeiten reichen 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 GaN-Optoelektronik aufzubauen.

Im vergangenen Jahr ist es dem FBH gelungen, die Technologien zum GaN-Wachstum weiterzuentwickeln und GaN-basierte Diodenlaser bei 400 nm Wellenlänge mit Spitzenwerten zu demonstrieren. Bei den UV-Lichtquellen erreichten UV-LEDs bei 375 nm eine Ausgangsleistung von mehr als 2 mW. Zudem wurden verschiedene neue Projekte initiiert, wie beispielsweise GaN-basierte Halbleiter-Scheibenlaser, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert werden, und die Entwicklung hochbrillanter grüner Laserdioden im neu gegründeten Sonderforschungsbereich (Sfb) 787.

The main focus of the GaN Optoelectronics Business Area is the development of innovative light emitters based on group III-nitride compound semiconductors. One of the unique features of the AlN-GaN-InN material system is that it covers an extremely wide wavelength range, which comprises the spectrum from the deep ultraviolet (UV) to the near infrared including the entire visible spectrum. This extraordinary property makes InAlGaN devices very interesting for numerous new applications. The R&D efforts are currently concentrating on the three key areas: The realization of GaN-based high-power lasers, the 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 GaN heterostructures and devices, metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) of InAlGaN materials, 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 combining 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 heterostructures and to demonstrate GaN-based diode lasers in the 400 nm wavelength range with state-of-the-art performance. In the area of UV light emitters the research activities have yielded near UV LEDs at 375 nm with more than 2 mW output power. Furthermore, a number of new projects have been initiated such as GaN-based semiconductor disk lasers, funded by the German Research Foundation (DFG) and the development of high-brilliance green laser diodes within the newly created Sonderforschungsbereich (Sfb) 787.

Innerhalb des letzten Jahres erzielte das FBH erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung von GaN-basierten Diodenlasern, die bei einer Wellenlänge von etwa 405 nm emittieren. Die Forschungsaktivitäten konzentrierten sich vorerst auf das Wachstum von Laserheterostrukturen mit separatem Einschluss auf Saphir-(0001)-Substraten. So wurde z. B. das MOVPE-Wachstum von InGaN-Multiquantenfilmen für die aktive Zone des Diodenlasers und von kurzperiodigen AlGaIn/GaN-Supergittern für dessen Mantelschichten untersucht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine verringerte Wachstumstemperatur die Homogenität der Quantenfilmlumineszenz auf der Mikrometerskala erhöht, während höhere Temperaturen zu einer glatteren InGaN/(In)GaN-Grenzfläche und damit zu einer homogeneren Lumineszenz auf der Nanometerskala führen. Für Wachstumstemperaturen des Multiquantenfilms zwischen 780°C und 820°C war die Schwellleistungsdichte für optisch gepumptes Lasern minimal. InGaN-Multiquantenfilm-Diodenlaser, die unter diesen optimierten Bedingungen auf Saphir-(0001)-Substraten hergestellt wurden, zeigten eine Laserschwelle bei Stromdichten von 6,8 kA/cm².

Within the past year FBH made significant progress in the development of GaN-based laser diodes emitting at wavelengths near 405 nm. The initial focus was on the growth of separate confinement laser heterostructures on (0001) sapphire substrates. The research activities included, e.g. the MOVPE of InGaN multiple quantum wells (MQW) for the laser diode active regions and the growth of AlGaIn/GaN short period superlattices for the cladding layers. Research results showed that lower growth temperatures improve the long range homogeneity of the quantum well (QW) luminescence whereas higher temperatures promote a smoother InGaN/(In)GaN interface morphology resulting in a homogeneous luminescence on a nm scale. A minimum threshold power density for optically pumped lasing was found for growth temperatures of the MQW active region between 780°C and 820°C. InGaN MQW laser diodes grown on c-plane sapphire substrates with these optimized conditions showed an onset of laser operation at current densities of 6.8 kA/cm².

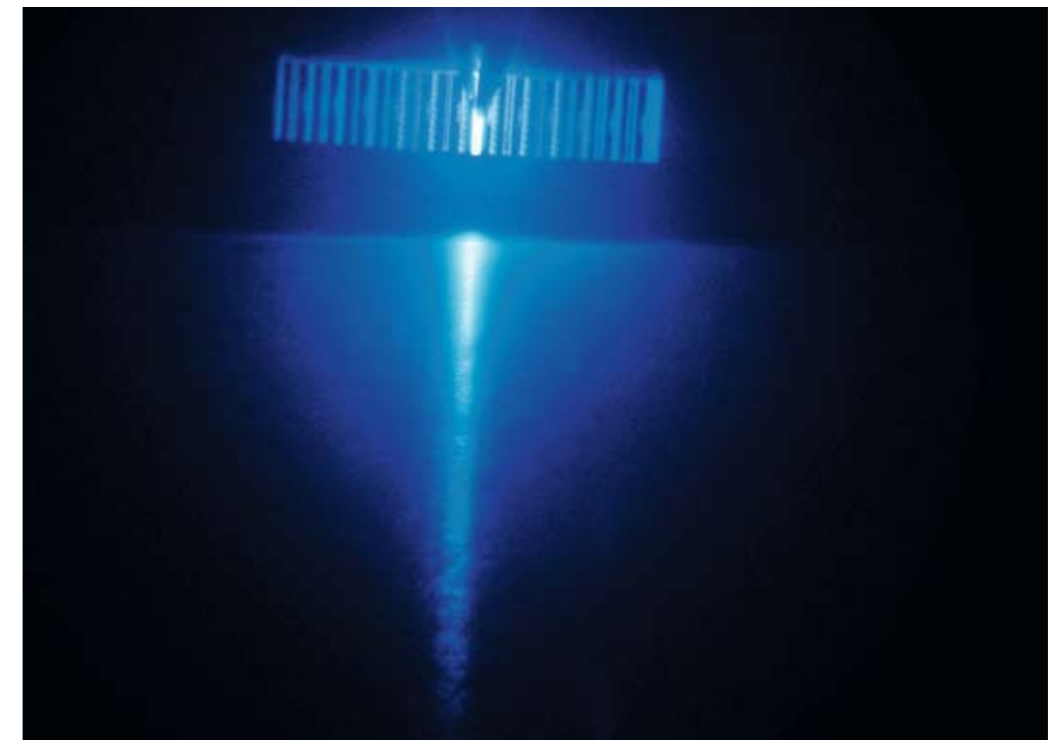


Abb. 1: Blau-violette Emission eines InGaN-Multiquantenfilm-Breitstreifen-Diodenlasers
Fig. 1: Blue-violet emission from a InGaN MQW broad area stripe laser diode bar

Die Forschungsaktivitäten in der Materialtechnologie wurden durch die Entwicklung der Basistechnologien zur Herstellung von Breitstreifen- und Rippenwellenleiter-Laserstrukturen ergänzt. Dazu gehörten auch das Spalten von Facetten, die Herstellung ohmscher p-Kontakte und das Aufbringen dielektrischer Schichten für hoch-reflektierende Spiegel. Um die Betriebseigenschaften der Diodenlaser weiter zu verbessern, wurde mit dem Wachstum von Laserheterostrukturen auf GaN-Substraten begonnen. Die Versetzungsdichte in den Lasern auf diesen Substraten war im Bereich 10^7 cm^{-2} und damit ungefähr zwei Größenordnungen geringer als bei vergleichbaren Strukturen auf Saphirsubstraten. Mit einer Schwellstromdichte von $3,5 \text{ kA/cm}^2$, einer maximalen Ausgangsleistung von 500 mW pro Facette und einer differentiellen Quanteneffizienz von 35% waren die 405-nm-Breitstreifenlaserdioden, die auf 2"-GaN-Substraten gewachsen wurden, auch erheblich besser als die auf Saphirsubstraten. Diese Ergebnisse sind ein bedeutender Meilenstein für die Forschungen auf dem Gebiet der GaN-Optoelektronik am FBH. Mit Ausnahme von Osram Opto Semiconductors hat keine andere Einrichtung in Europa GaN-Laser mit ähnlichen Eigenschaften demonstriert.

Im Rahmen der Entwicklung von Diodenlasern mit einer Emission im blauen und grünen Spektralbereich wurde damit begonnen, das Wachstum hochwertiger

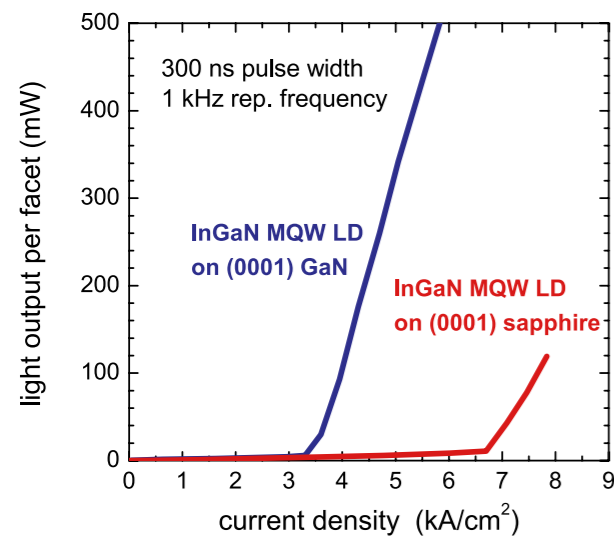


Abb. 2: Lichtausgangsleistung in Abhängigkeit von der Stromdichte eines InGaN-Multiquantenfilm-Diodenlasers auf einem Saphir- und einem GaN-Substrat

Fig. 2: Light output vs. current density characteristics of InGaN MQW laser diode on sapphire and low dislocation density GaN substrate

Research activities in the materials technology area were complemented by the development of key fabrication processes for broad area stripe and ridge waveguide laser structures, including processes for facet cleaving, ohmic p-contact formation, and the realization of dielectric layers for highly reflective mirror coatings. In order to further improve the laser diode performance FBH has also begun with the growth of laser heterostructures on bulk GaN substrates. The dislocation density of the lasers on bulk GaN substrates was in the low to mid 10^7 cm^{-2} range, which is roughly two orders of magnitude lower than for lasers grown on sapphire. First 405 nm broad area stripe laser diodes grown on 2" bulk GaN substrates yielded a significant improvement in laser performance with threshold current densities as low as 3.5 kA/cm^2 , peak output powers of 500 mW per facet, and differential quantum efficiencies of 35%. This achievement marks a significant milestone for GaN optoelectronics research at the Ferdinand-Braun-Institut. Except for Osram Opto Semiconductors, no other institution in Europe has been able to successfully demonstrate GaN lasers at similar performance levels.

In order to explore laser devices emitting in the blue and green wavelength range, FBH has begun to investigate the growth of high-quality InGaN QWs structures with higher indium compositions. The

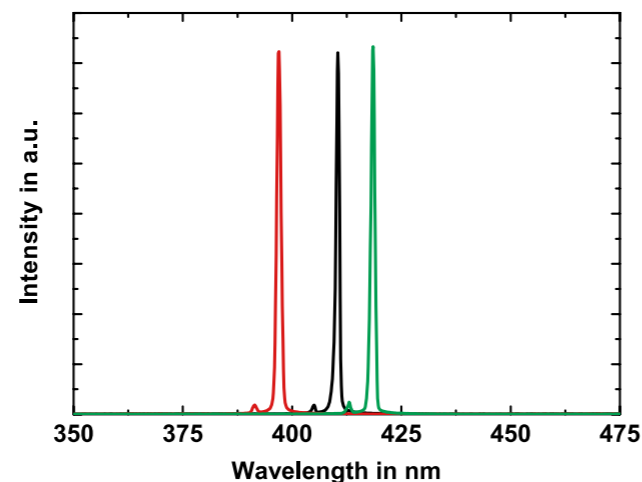


Abb. 3: Emissionsspektren von Diodenlasern auf Saphir mit unterschiedlichen InGaN-Multiquantenfilmen

Fig. 3: Emission spectra of laser diodes on sapphire with different InGaN multiple quantum well active regions

InGaN-Multiquantenfilme mit höheren Indiumgehalten zu untersuchen. Geringe Quanteneffizienzen durch hohe piezoelektrische Felder und eine verschlechterte Kristallqualität sind hier die größten Herausforderungen. Der Forschungsgruppe am FBH gelang es, die piezoelektrischen Felder in InGaN-Multiquantenfilmen zu vermessen. Es wurde auch gezeigt, wie man diese Felder durch die Zusammensetzung der Barriere einstellen kann, und zwar mittels Hinzufügen von Indium oder der teilweisen Dotierung mit Silizium. Durch ein Anheben der Wachstumstemperatur während des Barrierenwachstums konnte zudem die Effizienz strahlender Rekombination erhöht werden. Als Ergebnis all dieser einzelnen Fortschritte wurden erste InGaN-Multiquantenfilm-Diodenlaser auf Saphir-(0001)-Substraten mit einer Emissionswellenlänge von 417 nm und optisch gepumpte Laser bei 426 nm demonstriert.

Veröffentlichungen // Publications

Olaf Krüger, "Mehr Flexibilität mit Laser-Direktstrukturierung", Mikroproduktion 2, 28 (2007).

Optimierung der aktiven Zone von ultravioletten InGaN/ InAlGaN-MQW-LEDs für die Emission bei 375 nm

Ultraviolette Leuchtdioden (UV-LEDs) mit Emissionswellenlängen nahe 375 nm können beispielsweise bei der fotokatalytischen Desodorierung in Klimaanlagen, zur Identifizierung gefälschter Banknoten, bei der Messung von Weißmachern in Papier sowie zum Aushärten von Polymeren und Druckfarben eingesetzt werden. UV-LEDs sind zugleich die Voraussetzung für die Entwicklung von LEDs mit kürzeren Wellenlängen im fernen UV. LEDs für den UV-B-Wellenlängenbereich um 300 nm sind unter anderem für die Medizintechnik zur Behandlung von Hautkrankheiten wie Schuppenflechte hochinteressant. LEDs für den UV-C-Bereich unterhalb 280 nm könnten zahlreiche neue Anwendungen erschließen, beispielsweise bei der Trinkwasserreinigung und der Abwasserbehandlung. Für LEDs, die bei Wellenlängen oberhalb von 380 nm emittieren, werden typischerweise InGaN-Quantentöpfe (QWs) mit (In)GaN-Barrieren als lichtemittierende Schichten verwendet. Für kurzweiligere

greatest challenges are poor quantum efficiencies due to the large piezoelectric fields as well as the deterioration in crystal quality are the greatest challenges. FBH's research group was able to measure the piezoelectric fields in InGaN QWs quantitatively and to show how the piezoelectric fields can be controlled by the barrier composition, e.g. by adding indium to the barriers and by partially doping the barriers with silicon. By increasing the growth temperature during the barrier growth, the radiative recombination efficiency could be improved. As a result of these efforts, first current-injection InGaN MQW laser diodes on c-plane sapphire substrates with an emission wavelength of 417 nm and optically pumped lasers with an emission of 426 nm have been demonstrated.

Near Ultraviolet LEDs at 375 nm with Optimized InGaN/ InAlGaN MQW Active Region

Near ultraviolet (UV) light emitting diodes (LEDs) in the vicinity of 375 nm are interesting for a number of applications. These include light sources for photo-catalytic deodorizers in air conditioning systems, excitation sources for identifying counterfeit banknotes and the measurement of blankophores in papers as well as the curing of polymers and inks. Near UV LEDs can also be considered as an important stepping stone for the development of LEDs at even shorter wavelengths. LEDs in the UV-B wavelength range for example are very interesting for medical applications like treatment of different types of skin diseases (e.g. Psoriasis), and LEDs emitting in the UV-C wavelength range could enable a number of new applications in the area of drinking water purification and waste water treatment. For LEDs emitting at wavelengths of 380 nm and beyond typically InGaN quantum wells (QWs) with (In)GaN barriers are used. However, for shorter

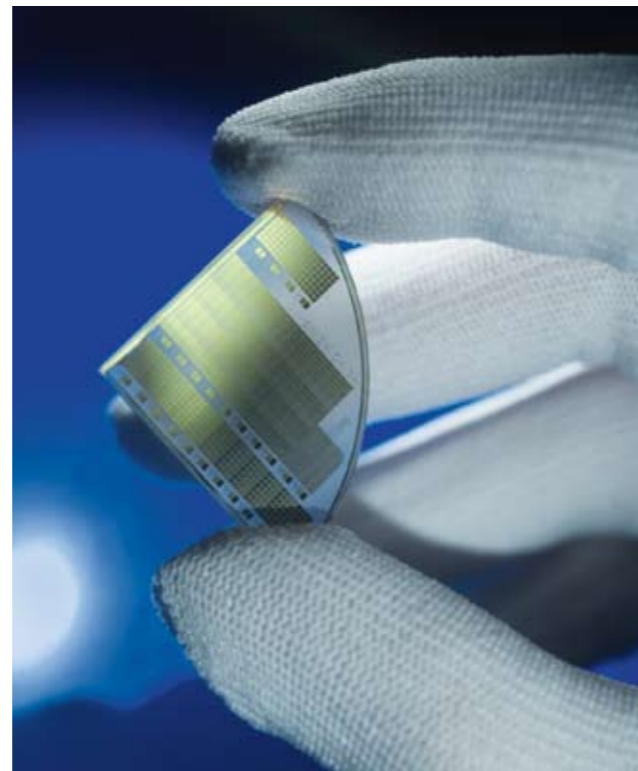
Emission sind (In)GaN-Barrieren allerdings ungünstig, da aufgrund der kleinen Bandkantendiskontinuitäten zwischen den InGaN-QWs und den Barrieren der Ladungsträgeranschluss ungenügend ist. Daher wurde der Einfluss von (In)AlGaN-Barrieren auf die Lichtausbeute von LEDs mit 375 nm Emissionswellenlänge untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Effizienz der LEDs sowohl durch die unterschiedlich großen Bandkantendiskontinuitäten als auch durch die Verspannung der Barrieren relativ zu den Quantentöpfen stark beeinflusst wird.

Die LED-Schichtstruktur wurde mit metallorganischer Gasphasenepitaxie auf c-orientiertem Saphir abgeschieden. Die lichtemittierende aktive Zone besteht aus fünf 3,5 nm dicken $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,07}\text{N}$ -Quantentöpfen, umgeben von jeweils 7 nm dicken $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ -Barrereschichten. Die Verspannung in den Schichten kann während deren Wachstum direkt mittels eines hochauflösenden in-situ Krümmungssensors detektiert werden. Die Messungen zeigten, dass mit GaN- bzw. mit gitterangepassten $\text{In}_{0,03}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,81}\text{N}$ -Barrieren die aktive Zone nahezu verspannungsfrei bezüglich der darunter befindlichen GaN-Basisschichten aufwächst. Im Gegensatz dazu wachsen aktive Zonen mit $\text{In}_{0,02}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,82}\text{N}$ - und $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ -Barrieren deutlich zugverspannt sowie $\text{In}_{0,04}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,80}\text{N}$ -Barrieren unter Druckspannung.

Basierend auf den unterschiedlichen Heterostrukturen wurden LED-Bauelemente mit einer Ni/Au-Metallisierung für die p-Kontakte und einer Ti/Al-Metallisierung

wavelengths (In)GaN barriers are not functional due to the small band-offset between the wells and the barriers and the resulting insufficient carrier confinement. Therefore, FBH has investigated the influence of (In)AlGaN barriers on the light output characteristics of LEDs emitting near 375 nm. In addition to the carrier confinement also the interfacial strain between the (In)AlGaN and InGaN was found to strongly affect the device performance.

The LED layer structure was grown on c-plane sapphire substrate by metalorganic vapor phase epitaxy. The active region consists of five 3.5 nm thick $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,07}\text{N}$ quantum wells embedded in 7 nm thick $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ barriers. The tensile and compressive strain in the layer structure was directly monitored during the growth by an in-situ high-resolution curvature sensor. FBH's measurements show that during the growth of the InGaN MQW with GaN barriers as well as for the lattice-matched $\text{In}_{0,03}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,81}\text{N}$ barriers the active region is nearly stress-free with respect to the GaN buffer. In contrast to that, $\text{In}_{0,02}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,82}\text{N}$ and $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ barriers clearly grew under tensile stress and $\text{In}_{0,04}\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,80}\text{N}$ barriers under compressive stress.



Waferstück mit UV-LEDs auf Saphirsubstrat
Quarter wafer with UV LEDs on sapphire substrate

für die n-Kontakte hergestellt. Die LED-Lichtleistung wurde "on-wafer" gemessen. Hierzu wurden die LED-Wafer auf eine Quarzplatte platziert und das substratseitig austretende Licht mit einer geeichten Si-Photodiode detektiert. Die Emissionsspektren der LEDs mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Barrierenschichten sind in Abb. 1 dargestellt. Die Spektren mit Peakwellenlängen nahe oder kleiner als 375 nm sind asymmetrisch, da Wellenlängen kürzer als 370 nm in den GaN-Basisschichten absorbiert werden. Daher wurden die Halbwertsbreiten der Spektren (FWHM) von LEDs mit 380 nm und langwelliger verglichen. Die LEDs mit GaN-Barrieren zeigten die schmalsten Emissionsspektren mit FWHM von ~10 nm und die geringste Oberflächenrauigkeit von RMS = 0,6 nm (gemessen mit dem Rasterkraftmikroskop). Die Strukturen mit unterschiedlichen InAlGaN-Barrieren weisen leicht erhöhte FWHMs von ~ 11,5 nm auf. Die höchste FWHM von 13 nm und einer Rauigkeit von 1 nm wurde an den Strukturen mit AlGaN-Barrieren gemessen.

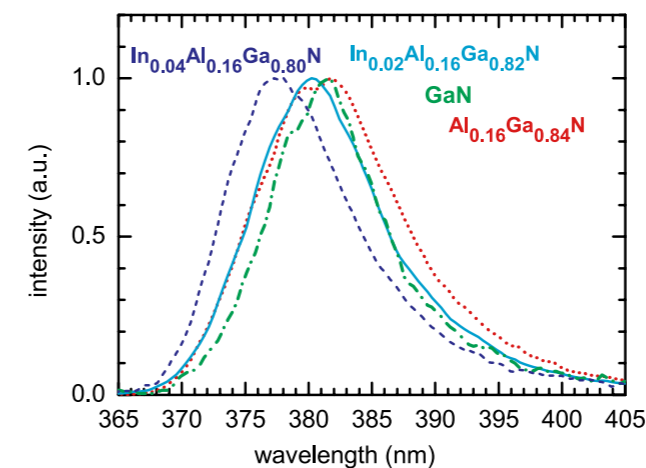


Abb. 1: Elektrolumineszenzspektren von LEDs mit unterschiedlichen Zusammensetzungen der MQW-Barrieren bei 50 mA
Fig. 1: Electroluminescence spectra of LEDs with different composition of the MQW barriers driven at 50 mA

Die Lichtleistungskurven der 375-nm-LEDs mit unterschiedlichen Barrieren sind in Abb. 2 dargestellt. Die geringste Lichtleistung zeigen die LEDs mit GaN-Barrieren, da sie ein sehr geringes Ladungsträgerkonfinement aufweisen. Die Verwendung von $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ -Barrieren führt hingegen zu einer 50-fachen Steigerung der Lichtleistung. LEDs mit gitterangepassten $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{0,84-x}\text{N}$ -Barrieren und Indiumkon-

Standard chip-processing technologies were used to fabricate test LEDs with Ni/Au contact pad as p-electrode and Ti/Al contacts as n-electrodes. The room temperature LED light output was measured on-wafer by placing the chip on a quartz plate without any cooling. The LED emission spectra with the different barrier layers are shown in fig. 1. The spectra with peak wavelengths near or below 375 nm are asymmetric due to light absorption in the GaN layers at wavelength below 370 nm. For LEDs emitting at 380 nm or above the full width at half maximum (FWHM) values of the spectra were compared. The LEDs with GaN barriers show the smallest FWHM of ~ 10 nm and the smallest surface roughness (measured by atomic force microscopy) of RMS = 0.6 nm. The structures with the different InAlGaN barriers have slightly higher FWHMs of ~ 11.5 nm. The highest FWHM value of 13 nm and a RMS roughness of 1 nm was observed for the devices with AlGaN barriers.

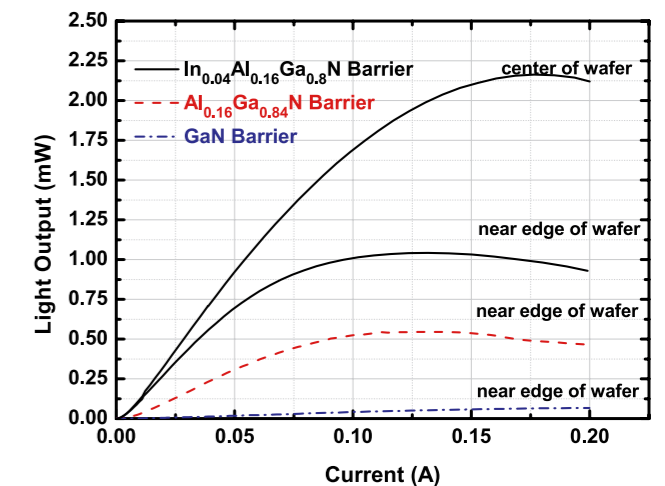


Abb. 2: On-wafer L-I-Kurven von 375 nm-LEDs mit unterschiedlichen Zusammensetzungen der MQW-Barrieren
Fig. 2: On-wafer L-I curves of LEDs emitting at 375 nm with different composition of the barriers in the MQW

The light output power curves of the LEDs emitting at 375 nm with the different barriers are shown in fig. 2. It is evident, that the light output of the LEDs with GaN barriers is very low due to weak carrier confinement. LEDs with $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ barriers yielded a 50-fold increase in the light output power. However, the highest light output of more than 2 mW was measured for the LEDs with lattice-matched $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{0,84-x}\text{N}$

zentrationen zwischen $x = 0,033$ und $x = 0,04$ weisen die höchsten Leistungen von über 2 mW auf. Die kleineren Halbwertsbreiten der Emissionsspektren der LEDs mit InAlGaN-Barrieren deuten auf eine höhere Qualität der Grenzflächen mit unverspannten InAlGaN-Barrieren hin, die in einer besseren Lichtausbeute resultiert. Zusätzlich haben diese spannungsangepassten Barrieren einen weiteren Vorteil. In Abb. 3 ist die Peakwellenlänge der LEDs mit unterschiedlichen MQW-Barrieren in Abhängigkeit vom Strom dargestellt. Um Aufheizungseffekte während des Betriebes der LEDs zu minimieren, wurden diese gepulst betrieben (Pulsdauer 1 μ s, Wiederholungsrate 50 Hz). Die beobachtete Verringerung der Peakwellenlänge mit steigendem Betriebsstrom wird reduziert wenn die In-Konzentration in den $\text{In}_x\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84-x}\text{N}$ -Barrieren auf $x = 0,04$ steigt. Mittels Bandstrukturberechnungen kann dieser experimentelle Befund als Resultat von Abschirmungseffekten der Polarisationsfelder und einer Bandkantenrenormalisierung verstanden werden.

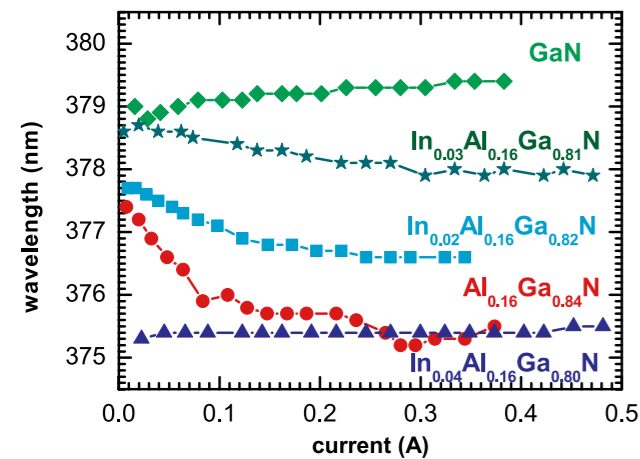


Abb. 3: Peakwellenlänge von LEDs mit unterschiedlichen MQW-Barrieren vs. Betriebsstrom (Wiederholungszyklus: 0,0005)
 Fig. 3: Peak wavelength of LEDs with different MQW barriers vs. driving current at duty cycle of 0.0005

barriers and indium content between $x = 0.033$ and $x = 0.04$. The smaller FWHM of the emission peak for the devices with InAlGaN barriers suggests a higher quality of the interfaces with unstrained InAlGaN barriers yielding better device performance. Additionally, these strain-engineered barriers offer another advantage. Fig. 3 shows the peak wavelengths of the LEDs with the different MQW barriers in dependence on the drive current. In order to prevent the self-heating of the devices during operation the LEDs were operated under pulsed conditions with a pulse width of 1 μ s at a repetition frequency of 50 Hz. The observed decrease of the peak wavelength with increasing current is reduced when the In mole fraction in the $\text{In}_x\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84-x}\text{N}$ barriers increase to $x = 0.04$. Band structure calculations explain these experimental findings as the result of screening of the polarization fields and band gap renormalization.

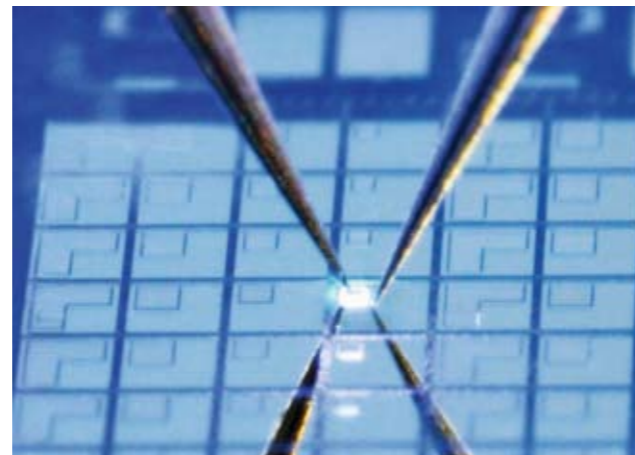


Abb. 4: 375 nm LEDs während des Tests
 Fig. 4: Near UV LEDs under test

Veröffentlichungen // Publications

A. Knauer, V. Kueller, S. Einfeldt, T. Kolbe, J.-R. van Look, V. Hoffmann, J. Piprek, M. Weyers, M. Kneissl, "Influence of the barrier composition on the light output of InGaN multiple-quantum-well ultraviolet light emitting diode", Proc. of SPIE 6797 (2007) 67970X-1.

F. Brunner, V. Hoffmann, A. Knauer, E. Steimetz, T. Schenk, J.-T. Zettler, M. Weyers, "Growth optimization during III-nitride multiwafer MOVPE using real-time curvature, reflectance and true temperature measurements", J. Crystal Growth 298 (2007) 202-206.

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

Mikrowellenkomponenten und -systeme
 Microwave Components and Systems

GaN-Elektronik
 GaN Electronics

Diodenlaser
 Diode Lasers

GaN-Optoelektronik
 GaN Optoelectronics

Materialien und Prozesse
 Materials and Processes

Netzwerke
 Networks



Materialien und Prozesse

In den letzten Jahren verlagerte das FBH den Schwerpunkt seiner technologischen Arbeiten vom etablierten, gut beherrschten Galliumarsenid hin zu den Gruppe-III-Nitriden. GaAs-Laserdioden werden weiterhin intensiv bearbeitet, während die Technologie der Leistungs-HBTs nicht mehr verfolgt wird. Bei den GaN-Bauelementen konzentrieren sich die Arbeiten auf Leistungsbauelemente 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. Dies betrifft insbesondere die Bereiche Materialtechnologie, Prozesstechnologie und Grundlagen für neue Bauelementkonzepte, die hierbei eine Schlüsselposition einnehmen. Diese Arbeiten, bei denen noch zahlreiche materialtechnologische Fragestellungen zu klären sind, liefern die technologischen Voraussetzungen für die genannten Bauelemente. Sie legen die Grundlagen für die gezielte Entwicklung von Bauelementen, die später in den jeweiligen bauelementorientierten Geschäftsbereichen durchgeführt wird.

Beispiele dafür sind die Schichtentwicklungen für GaN-basierte Hochvolt-Leistungstransistoren sowie die Epitaxie von Ga(In)N-Schichtstrukturen mit nicht-polarer 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 im Zusammenhang mit der "Embedded Gate Technologie" sowie von Recess-Techniken zur Realisierung von Normally-off-Hochleistungstransistoren. Im Bereich der GaN-Optoelektronik für UV-LEDs und Laser steht die Entwicklung eines geeigneten Ohm'schen Kontakts zu p-GaN im Vordergrund.

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 und Waferprozesse für Kunden aus Forschung und Industrie.

Materials and Processes

During the recent years, FBH gradually changed its focus from well established GaAs technologies to group-III nitrides for both, electronic and optoelectronic applications. Research on GaAs-based laser diodes is still intensively pursued, whereas further technology developments for power HBTs are not considered anymore. 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 focused 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 is going on, 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 the embedded gate concept and for recess techniques towards the realization of normally-off transistors. For GaN LEDs and lasers, the development of p-type ohmic contact is of central importance.

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

GaN-HVPE zur Herstellung defektarmer Substrate

Die Eigenschaften optoelektronischer Bauelemente auf der Basis von Gruppe III-Nitriden haben sich in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert. Das hat zu einer immer breiteren Anwendung solcher Bauelemente und einer international verstärkten explorativen Forschung auf dem Gebiet geführt. Blaue Laserdioden aus GaN ermöglichen die hohen Speicherdichten der neuen "Blue Ray"-DVDs; GaN-LEDs spielen eine wichtige Rolle in der Beleuchtungs-, Display- und Projektionstechnik. Durch etablierte Verfahren der Volumenkristallzucht können bisher jedoch keine geeigneten Substrate für homoepitaktisches Wachstum zur Verfügung gestellt werden. Das erschwert weitere potenzielle Anwendungen zur Erzeugung von UV-Licht durch LEDs und auch die Erhöhung der Leistung bei blauen Laserdioden. Für die meisten Anwendungen in der Optoelektronik werden die erforderlichen Schichtstrukturen deshalb heteroepitaktisch auf dem Fremdsubstrat Saphir hergestellt. Die damit verbundenen hohen Versetzungsdichten von bis zu 10^{10} cm^{-2} beeinträchtigen jedoch die Effizienz und Lebensdauer der Bauelemente erheblich. Durch geeignete Technologien kann die Versetzungsdichte zwar um Größenordnungen abgesenkt werden, dennoch bleiben Versetzungsdichten oberhalb 10^6 cm^{-2} weiterhin für viele Anwendungen zu hoch. Hinzu kommen Probleme wie die ungenügende thermische Leitfähigkeit von Saphir oder starke Durchbiegungen der Schichtstrukturen durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung des Substrates bis hin zum Zerreißen der Schichten beim Abkühlen nach der Epitaxie. Weltweit wird daher an Möglichkeiten zur Herstellung defektarmer GaN-Substrate geforscht.

Der erfolgversprechendste Ansatz ist dabei die Hydridgasphasen-Epitaxie (HVPE: Hydride Vapor Phase Epitaxy), da dieses Epitaxieverfahren aufgrund der möglichen hohen Wachstumsraten auch auf die Herstellung von Massivkristallen ausgedehnt werden kann. Bei der HVPE von GaN wird Ga eingesetzt, das über die Reaktion mit HCl zu GaCl zum Substrat transportiert wird und dort mit NH_3 (Ammoniak) GaN bildet.

Im Rahmen eines durch das BMBF geförderten Vorhabens wird am FBH die Herstellung von sehr dicken GaN-Schichten bis hin zu Massivkristallen mittels HVPE entwickelt. Dabei wird die gesamte Wertschöpfungskette abgedeckt: von der Konstruktion und dem Bau einer zur Herstellung von Massivkristallen geeigneten Zuchtungsanlage (Aixtron AG) über die Entwicklung von Prozessen zur Schicht- und

GaN HVPE for Substrates with Low Defect Density

The performance of optoelectronic devices based on group III-nitrides has been continuously improved in recent years. Hence, the number of applications increased and the efforts on explorative research in this field were considerably strengthened world-wide. Blue GaN laser diodes enable the high storage density of "Blue Ray" DVDs and GaN LEDs play an important role in lighting as well as in display and projection technology. However, native substrates as required for homoepitaxial growth of device structures can not be manufactured by conventional bulk crystal growth so far. This lack hampers further promising applications based on the generation of UV light from LEDs or improved output power of blue laser diodes. For most optoelectronic applications sapphire is still used as substrate at the expense of device efficiency and lifetime due to the resulting high dislocation densities of up to 10^{10} cm^{-2} . The latter can be reduced by orders of magnitude by additional process steps like ELOG, but remaining dislocation densities above 10^6 cm^{-2} are still too high for many applications. Additionally, the use of foreign substrates can result in strong bows up to cracking of the layers due to differential thermal expansion of substrate and layer. Consequently, there are world-wide efforts to develop native GaN substrates with low defect density. The most promising approach so far is hydride vapor phase epitaxy (HVPE), which offers high growth rates and thus can even be extended to the growth of bulk crystals. HVPE of GaN uses gallium (Ga) which is transported as gallium chloride (GaCl) via reaction with hydrogen chloride (HCl). On the substrate it reacts with ammonia (NH_3) to form GaN.

Within a BMBF supported project the growth of very thick GaN layers up to bulk crystals is developed at FBH. Here the complete value chain is covered, from building the necessary tools for bulk growth of GaN (Aixtron AG), the process development for crystal growth at FBH, establishing the crystal production and subsequent process steps of sawing and polishing at FCM up to the use of the substrates for UV LEDs and laser diodes. Work at FBH focuses on process development for n-type GaN crystals in a vertical reactor (fig. 1), improvement of the growth system in cooperation with Aixtron, and evaluation of GaN substrates in MOVPE. Basic investigations of growth mechanisms as well as R&D to manufacture freestanding GaN substrates of 2 inch size have been carried out in a horizontal HVPE reactor.



Abb. 1: Vertikale HVPE-Anlage (Prototyp) zum Wachstum von GaN-Kristallen
Fig. 1 Vertical HVPE system (prototype) for GaN boule growth

Kristallherstellung am FBH, die Etablierung der GaN-Kristallherstellung sowie die Entwicklung der nachfolgenden Säge- und Polierprozesse bei FCM bis hin zum Einsatz für UV-LEDs und Laserdioden. Die Arbeiten am FBH konzentrierten sich auf die Prozess- und, in Kooperation mit Aixtron, auf die Anlagenentwicklung zum Wachstum von n-leitenden GaN-Kristallen in einem vertikalen Reaktor (Abb. 1). Grundlagenuntersuchungen, Prozessentwicklungen und Herstellung 2 Zoll großer, freistehender GaN-Substrate wurden in einem horizontalen HVPE-Reaktor durchgeführt.

Neben dem Wachstum auf Saphir als Startsubstrat wurde auch das Wachstum von GaN in der HVPE auf Lithiumaluminiumoxid LiAlO_2 zur Herstellung freistehender GaN-Substrate weiter untersucht. Das am FBH bereits entwickelte Verfahren zum Wachstum freistehender, c-plane orientierter GaN-Substrate wurde verbessert und die früher beobachtete Degradation der Randbereiche konnte beseitigt werden (Abb. 2). Die Kristallqualität solcher freistehenden GaN-Schichten erreicht jedoch nicht die von frei-

In addition, investigations on the growth of freestanding GaN layers using lithium aluminum oxide (LiAlO_2) as starting substrate were going on. The method for the growth of freestanding c-plane oriented GaN substrates formerly developed at FBH was remarkably improved and the so far observed degradation of the regions near the wafer edge could be eliminated (fig. 2). Nevertheless, the crystal quality of such layers can not compete with those of freestanding GaN layers which were separated from sapphire using an ELOG technology developed at FBH in parallel (fig. 3). The full width of half maximum (FWHM) of x-ray rocking curves is a measure for the crystal quality. The FWHM at the 002 reflection increases with the density of screw or mixed dislocations (also called tilt) and that at the 302 reflection follows the density of edge dislocations (twist).

The FWHM values of freestanding GaN layers grown on LiAlO_2 substrates were reduced from 1000 arcsec to 400 arcsec. A further decrease of FWHM values to below 240 arcsec (measured values of 234 arcsec at the 002 reflection and 237 arcsec at the 302 reflection)

stehenden GaN-Schichten, die durch Ablösung von Saphir unter Einsatz einer ebenfalls am FBH entwickelten ELOG-Technologie hergestellt werden (Abb. 3). Als Maß für die kristalline Qualität gelten möglichst kleine Werte der Halbwertsbreiten der Röntgen-Rockingkurven am 002 Reflex, der durch Schraubenversetzungen bzw. sogenannten Tilt verbreitert wird, und am 302 Reflex, der durch Stufenversetzungen bzw. sogenannten Twist verbreitert wird. Diese Halbwertsbreiten von freistehenden GaN-Schichten, die auf LiAlO_2 -Substraten gewachsen wurden, konnte von 1000 arcsec auf 400 arcsec reduziert werden. Durch zusätzliche Anwendung der ELOG-Technologie konnten die Halbwertsbreiten auf unter 240 arcsec (237 arcsec am 302 Reflex, 234 arcsec am 002 Reflex) reduziert werden. Dagegen konnten

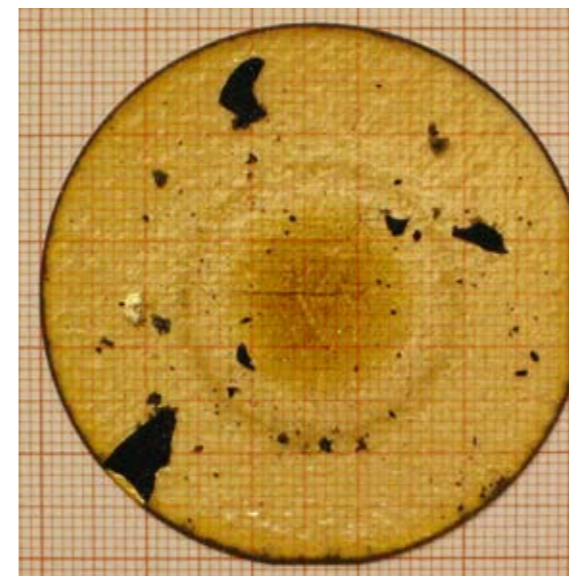


Abb. 2: 200 µm dicke, freistehende GaN-Schicht, die auf LiAlO_2 abgeschieden wurde
Fig. 2: 200 µm thick, freestanding c-plane GaN layer grown by HVPE on LiAlO_2

an freistehenden GaN-Schichten, die durch Ablösung von mit WSiN -Masken strukturierten GaN/Saphir-Ausgangssubstraten gewonnen wurden, geringere Halbwertsbreiten von 117 arcsec am 002 Reflex und 104 arcsec am 302 Reflex erreicht werden. Die bessere Eignung von Saphir als Startsubstrat liegt in einem kleineren Unterschied des thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu GaN begründet, wodurch dickere und versetzungsärmere Templates möglich sind. LiAlO_2 -Substrate ermöglichen im Gegensatz zu Saphirsubstraten auch das Wachstum von m-plane orientierten

tion) was achieved when the ELOG technology was combined with HVPE growth on LiAlO_2 substrates. But rocking curves recorded on freestanding GaN layers obtained by ELOG starting with sapphire as shown in fig. 3 revealed lower FWHM values of 117 arcsec at the 002 reflection and 104 arcsec at the 302 reflection. The advantage of sapphire derives from the smaller thermal mismatch to GaN that allows for thicker templates with lower dislocation densities.

In contrast to sapphire substrates, LiAlO_2 substrates also allow for the growth of m-plane oriented GaN layers. This non-polar orientation is of interest for optoelectronic devices since the reduction of the internal quantum efficiency due to the impact of polarization fields is avoided. Therefore, m-plane growth

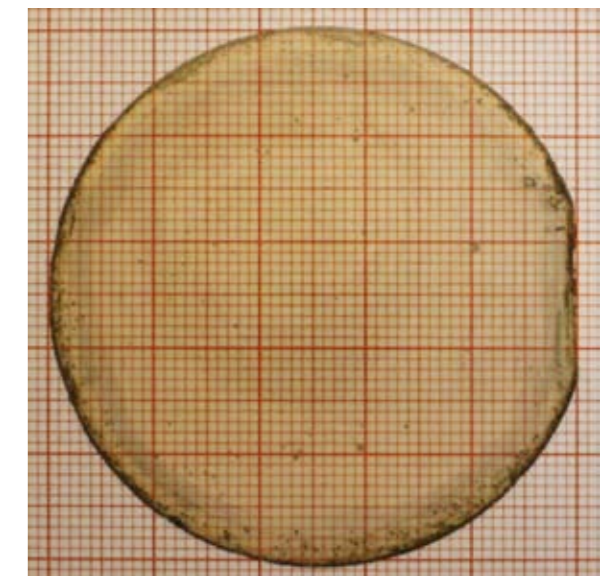


Abb. 3: 400 µm dicke, freistehende GaN-Scheibe aus saphirbasiertem HVPE-ELOG-Prozess
Fig. 3: 400 µm thick, freestanding c-plane GaN wafer obtained from HVPE growth with ELOG technology starting from sapphire

of GaN on LiAlO_2 substrates in metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE) was established at FBH. Using such layers as starting templates, HVPE processes have been developed to fabricate freestanding, m-plane oriented GaN substrates as shown in fig. 4.

In addition to dislocations, during the growth of m-plane GaN layers stacking faults occur. In close cooperation with the crystallography department of Humboldt-Universität zu Berlin the nature of such defects and their development with growing layer

tierten GaN-Schichten. Diese nichtpolare Orientierung ist für optoelektronische Bauelemente interessant, weil Verluste bei der internen Quanteneffizienz durch Polarisationsfelder vermieden werden können. Hierzu wurde am FBH das m-plane Startwachstum auf LiAlO₂-Substraten in der MOVPE etabliert. Auf solchen Templates wurden freistehende m-plane orientierte GaN-Substrate entwickelt (Abb. 4).

Beim Wachstum von m-plane orientiertem GaN treten zusätzlich zu Versetzungen auch Stapelfehler auf. Das Verständnis ihrer Entstehung und Fortpflanzung bildet die Grundlage für die weitere Verbesserung von m-plane orientierten GaN-Schichten und ist ein Forschungsthema, das in enger Kooperation mit der Arbeitsgruppe Kristallografie der Humboldt-Universität untersucht wird. Die Reduktion der Versetzungsdichte unter 10⁶ cm⁻² in c-plane orientierten GaN-Substraten und die Etablierung einer kostengünstigen Technologie zur Herstellung von GaN-Substraten sind die Motivation für das Boulewachstum von GaN mittels der HVPE. Dazu wurden Wachstumsuntersuchungen in dem vertikalen Reaktor (Abb. 1) durchgeführt. Auf einem freistehenden GaN-Substrat wurde ein GaN-Boule von 3,5 mm Dicke erreicht (Abb. 5).

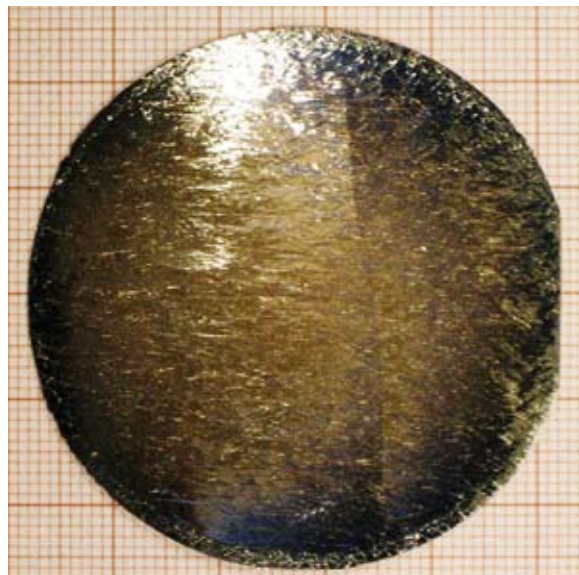


Abb. 4: 180 µm dicke, freistehende m-plane orientierte GaN-Schicht, die auf LiAlO₂ abgeschieden wurde
Fig. 4: 180 µm thick, freestanding m-plane GaN layer grown by HVPE on LiAlO₂

thickness is being investigated. Understanding these defects is a prerequisite for further improvement of m-plane GaN layers.

The driving force of using HVPE for the growth of bulk GaN boules with c-plane orientation is to establish a cost-efficient technology for GaN wafers with a threading dislocation density below 10⁶ cm⁻². To this end, growth studies have been performed using the vertical reactor shown in fig. 1. Using a freestanding GaN substrate similar to the one shown in fig. 3, a GaN boule of 3.5 mm length has been achieved (fig. 5).

Along the edge of the boule an accumulation of defects can be seen. It was observed that the diameter of such defects at the surface increases with the length of the boule. These so-called V-pits consist of inverse pyramids which detrimentally change the morphology of the growth front. Their formation must be suppressed in order to realize longer GaN boules.

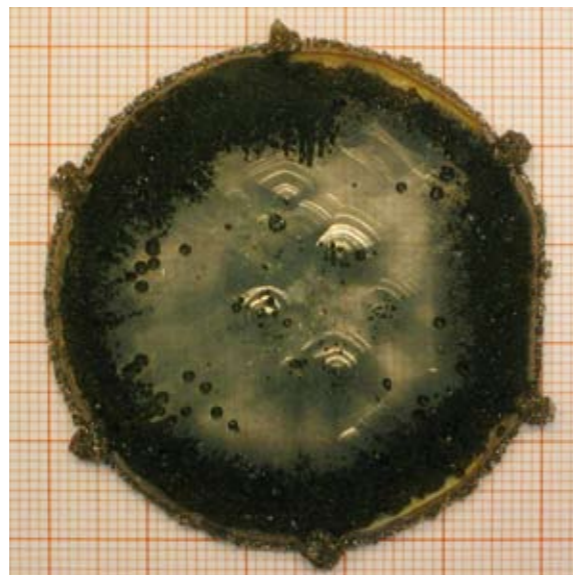


Abb. 5: 3,5 mm dickes GaN-Boule
Fig. 5: 3.5 mm thick GaN boule

Am Rand des Boules haben sich dabei Defekte gehäuft, deren Durchmesser auf der Oberfläche mit steigender GaN-Dicke wächst. Diese sogenannten V-Pits sind inverse Pyramiden, die die Wachstumsfront beeinträchtigen und deren Bildung durch weitere Optimierung der Wachstumsbedingungen unterdrückt werden muss, um größere Boulelängen möglich zu machen.

Veröffentlichungen // Publications

M. Weyers, E. Richter, Ch. Hennig, S. Hagedorn, T. Wernicke, G. Tränkle, "GaN substrates by HVPE", Proc. SPIE, Vol. 6910, 69100I (2008). Accepted December 2007, published February 2008.

Nichtpolares und semipolares Galliumnitrid

Galliumnitrid (GaN) ist anders als die etablierten Halbleiter Si und GaAs sehr polar, das heißt es weist hohe interne elektrische Felder durch spontane Polarisation auf. Diese Felder weisen in die [0001] c-Richtung, die übliche Wachstumsrichtung für GaN. Auf der (0001) c-Ebene (c-plane) werden am FBH GaN-Transistoren (HFETs) sowie Leucht- und Laserdioden (LEDs und LDs) im Wellenlängenbereich von 280 nm bis 450 nm hergestellt. Die Polarisation in GaN entsteht durch den ionischen Bindungscharakter mit negativ geladenen Stickstoffatomen (N) und positiven Ga-Atomen in Verbindung mit der hexagonalen Kristallstruktur. Da die Atome in Doppellagen aus Ga bzw. N angeordnet sind (siehe Abb. 1), entsteht ein elektrisches Polarisationsfeld in c-Richtung. Dieses elektrische Feld führt in Quantenfilmen, wie sie in LEDs und LDs verwendet werden, zum "Quantum Confined Stark Effect" (QCSE): Die Farbe einer LED verändert sich in Abhängigkeit vom elektrischen Strom und die Effizienz ist niedriger als in einem feldfreien Bauelement.

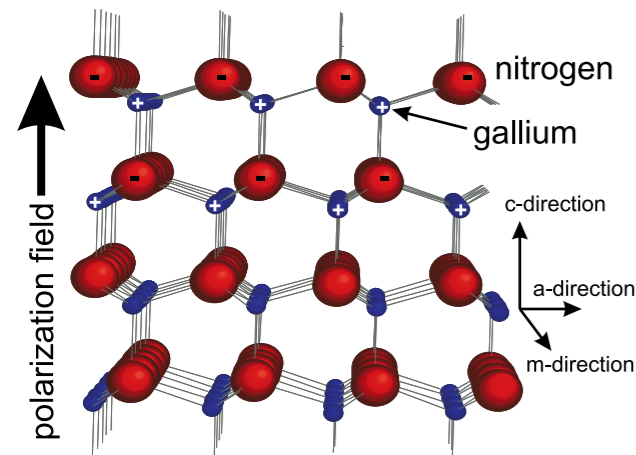
Die Vermeidung des Polarisationsfeldes und damit des QCSE in Wachstumsrichtung ist möglich, indem man für das Wachstum eine Ebene senkrecht zur "polaren" c-Ebene benutzt - eine so genannten "nichtpolare" Ebene. Falls die Wachstumsebene einen Winkel zwischen 0 und 90° zur c-Ebene hat, nennt man diese "semipolar". Quantenfilme auf diesen Ebenen zeigen einen deutlich reduzierten QCSE.

Nonpolar and Semipolar Gallium Nitride

In contrast to the established semiconductors Si and GaAs, gallium nitride (GaN) features strong internal electric fields due to spontaneous and piezoelectric polarization. These polarization fields are aligned along the [0001] c-direction which is the common growth direction for all commercially available GaN-based light emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs). At FBH GaN based transistors (HFETs) as well as LEDs and LDs from 280 nm to 450 nm are fabricated on (0001) c-plane GaN. The polarization field is caused by the ionic bonding, i.e., by a charge transfer from the gallium to the nitrogen atoms and the hexagonal crystal structure. Since the atoms are arranged in double layers of Ga and N (see fig. 1), the field is perpendicular to these layers - along the c-direction. In quantum wells that are used in LEDs and LDs, these electric fields cause the Quantum Confined Stark Effect (QCSE): The color blueshifts with increasing drive current and the efficiency is decreased compared to field free devices.

Polarization fields in growth direction and therefore the QCSE can be avoided, if the growth is conducted on a plane perpendicular to the c-plane - a so called "nonpolar" plane. If the growth plane and the c-plane include an angle between 0 and 90° it is called "semipolar". Quantum wells on those planes have a strongly reduced QCSE.

Da es noch nicht möglich ist, GaN als große Volumenkristalle herzustellen, sind nicht- oder semipolare GaN-Substrate in industrierelevanten Größen (mindestens 2" Durchmesser) derzeit nicht verfügbar. Daher entwickelt das FBH Wachstumsprozesse für nicht- und semipolares GaN auf verschiedenen Substraten als Basis für verbesserte LEDs und Laserdioden.



Semi- or nonpolar GaN substrates are not yet available in relevant sizes (i.e., diameter 2" or larger) since GaN volume crystals currently can not be grown in the necessary size. Therefore, FBH develops growth processes on different foreign substrates as a basis for improved LEDs and LDs.

Abb. 1: Modell eines GaN-Kristalls: GaN besteht aus Schichten von negativ (-) geladenen Stickstoffatomen (rot) und positiv (+) geladenen Galliumatomen. Das Polarisationsfeld ist daher senkrecht zu diesen Schichten entlang der c-Achse.

Fig. 1: Model of a GaN crystal: GaN consists of layers with negatively (-) charged nitrogen atoms (red) and positively (+) charged Ga atoms. The polarization field is perpendicular to the layers, i.e., along the c-axis.

Die Vorteile der nicht- und semipolaren Orientierungen erkaufte man sich derzeit noch mit höheren Defektdichten und Defektypen, die bei Wachstum in c-Richtung nicht auftreten. Stapelfehler in der Basalebene bilden flache und dünne Quantentöpfe, die eine charakteristische Emission bei 362 nm bei 10 K aufweisen. Die Defektdichte kann durch laterales Überwachsen (ELOG) reduziert werden. Dabei wächst GaN zuerst nur in den Fenstern in einer Streifenmaske aus Siliziumdioxid (SiO_2). Anschließend wächst es lateral über der Maske weiter. Da das Material dort keine direkte Verbindung zum Substrat hat, ist es fast defekt- und spannungsfrei. Je nach Streifenorientierung bilden sich verschiedene Facetten aus, wie es Abb. 2 für das Beispiel von nichtpolarem a-Ebenen GaN zeigt. Dabei ist insbesondere die Streifenorientierung parallel zur [01-10] Richtung (Abb. 2c) interessant. Die Seitenfacetten verlaufen senkrecht zur Oberfläche. Dies verhindert, dass sich Kristalldefekte in den lateral überwachsenen Bereich ausdehnen können. Mit Hilfe von Kathodolumineszenzmikroskopie und -spektroskopie kann man die verschiedenen Wachstumsregionen sehr gut abbilden. In Abb. 3a ist die Wellenlänge der Emission zu sehen: In der Region über dem Fenster, im schwarzen Bereich, ist die Intensität sehr niedrig. Dort verhindern viele Verset-

On these substrates the advantage of nonpolar or semipolar surfaces is currently offset by higher defect densities and new defect types which do not occur on c-plane GaN. One type of defect, the basal plane stacking fault (BSF), acts as thin quantum well, emitting at a wavelength of 362 nm (emission of defect-free GaN is around 357 nm) at a temperature of 10 K. The defect density can be reduced by epitaxial lateral overgrowth (ELOG). For ELOG a GaN layer on foreign substrate (e.g. sapphire) is covered with a SiO_2 mask. The GaN grows only in the mask openings (windows) but not on the mask. Later on, the crystal can grow laterally from the window over the mask. In the laterally grown regions, the material has no contact to the mask and is nearly free of defects and strain. For stripe masks the orientation along special crystal directions yields very different facets, like shown in fig. 2 for nonpolar a-plane GaN. Especially the [01-10] orientation (fig. 2c) is interesting: The side facets are perpendicular to the surface avoiding a spreading of crystal defects into the laterally overgrown wing. The different growth domains can be visualized by cathodoluminescence microscopy and spectroscopy. In fig. 3b the wavelength of the highest peak is shown: Directly above the window the intensity is very low due to the high dislocation

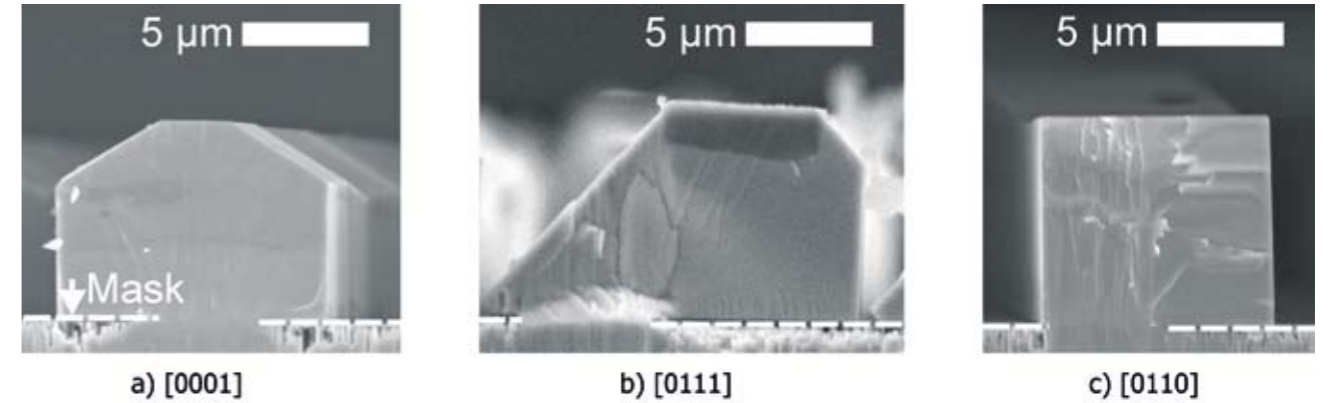


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von a-Ebenen ELOG-Spaltflächen nach Überwachsen von verschieden orientierten Streifenmasken (a-c) Fig. 2: Scanning electron micrograph of a-plane ELOG samples (cleaved perpendicular to stripe) with a different in-plane orientation of stripe mask pattern of 0°, 45° and 90° (a-c) to the 0001 direction

zungen strahlende Rekombination. Im Bereich darüber findet man ausschließlich die Stapelfehleremission bei 362 nm. Allein im lateral überwachsenen Bereich sieht man eine scharfe intensive bandkantennahe Lumineszenz, wie sie nur in defektfreiem GaN zu finden ist. Diese Bereiche sind daher für die Prozessierung von Bauelementen geeignet.

density. Above the dark region only BSF emission at 362 nm is found. Only in the laterally overgrown region on the left hand side there is a sharp intensive near band edge luminescence (blue-violet color coded), which is only observable in GaN with a low defect density. These areas are interesting for device processing.

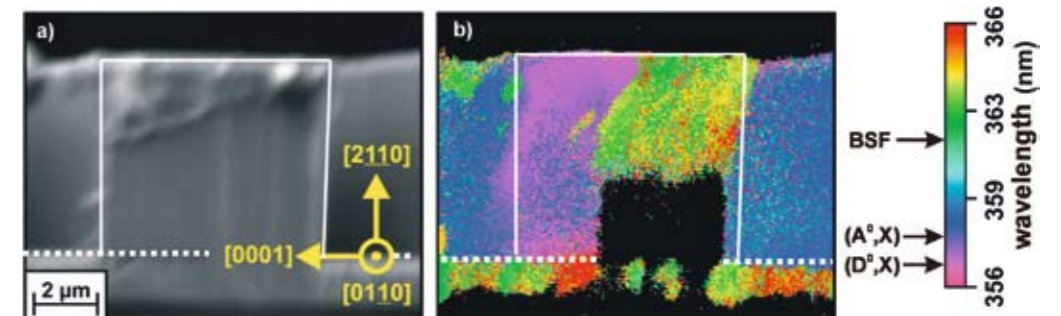


Abb. 3: Kathodolumineszenzmikroskopische Aufnahme bei 10 K (b) eines ELOG-Streifens zusammen mit der Rasterelektronenmikroskopaufnahme (a) derselben Stelle. Die Maske ist gestrichelt dargestellt und die Kanten des ELOG-Streifens sind weiß markiert. An der Wellenlängenskala sind die bandkantennahe Emissionen (A^0,X) und (D^0,X), sowie die Stapelfehleremission (BSF) eingezeichnet (in Zusammenarbeit mit AG J. Christen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg). Fig. 3: Cathodoluminescence peak wavelength image at 10 K (b) of an ELOG bar and the corresponding secondary electron image (a). The mask is indicated by a dotted line, the edges of the ELOG bar are drawn solid. The colors corresponding to the wavelengths of BSF and near band edge emissions (D^0,X) and (A^0,X) are indicated by arrows (in collaboration with AG J. Christen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg).

Veröffentlichungen // Publications

C. Netzel, T. Wernicke, U. Zeimer, F. Brunner, M. Weyers, M. Kneissl, "Near band edge and defect emissions from epitaxial lateral overgrown a-plane GaN with different stripe orientations", Journal of Crystal Growth 310, 8 (2008). Accepted September 2007, published April 2008.

MOVPE von Aluminiumnitrid (AlN)

UV-LEDs mit Wellenlängen von 350 nm bis 210 nm sollen künftig ineffiziente und giftige Quecksilber-Dampflampen ersetzen. Darüber hinaus erschließen sie weitere Anwendungen in der Sensorik, Medizin und Hygiene sowie für photochemische Prozesse, die z. B. beim Aushärten von Lacken eingesetzt werden. Solche LEDs basieren auf den Nitriden (Al,Ga,In)N. GaN-LEDs mit Wellenlängen von 370 nm bis in den grünen Spektralbereich werden auf GaN-Substraten oder dicken GaN-Schichten auf Saphir abgeschieden. Für kürzere Wellenlängen müssen die Basisschichten aus AlGaIn bis hin zu AlN bestehen, da die Absorption sonst zu hoch ist und auch die Verspannung zwischen Unterlage und den lichtemittierenden (In)AlGaIn-Schichten zu groß wird.

MOVPE of Aluminumnitride (AlN)

UV LEDs in the wavelength range from 350 nm to 210 nm are supposed to replace low efficiency and toxic mercury lamps. Further applications can be found in medicine and sensors as well as in photochemical processes, i.e., for the curing of coatings. Such UV LEDs are based on nitride semiconductors (Al,Ga,In)N. GaN LEDs covering the wavelength range between 370 nm and the green spectral range are grown on GaN substrates or thick GaN template layers on sapphire. For shorter wavelengths increasing light absorption in GaN and also strain, a GaN buffer layer and the light-emitting (In)AlGaIn require AlGaIn or AlN buffer layers.



Abb. 1: MOVPE-Anlage für das Wachstum von (Al,Ga)N. Das Detailbild zeigt den Hochtemperatur-Suszeptor in der 11 x 2 Zoll Konfiguration.
Fig. 1: MOVPE reactor for the growth of (Al,Ga)N. The inset shows the high-temperature susceptor with a 11 x 2 inch configuration.

AlN weist üblicherweise eine gegenüber GaN deutlich erhöhte Defektdichte auf, die die Effizienz von UV-LEDs limitiert. Das Wachstum von AlN mit geringer Defektdichte ist damit die Grundlage für eine Erhöhung der Effizienz und Leistung von UV-LEDs. Darüber hinaus muss die AlN-Epitaxie beherrscht werden, um Transistoren für sehr hohe Arbeitstemperaturen entwickeln zu können.

Ein Grund für die höhere Defektdichte von AlN ist die geringe Beweglichkeit von Al auf der wachsenden Oberfläche. Diese steigt jedoch bei höheren Wachstumstemperaturen. In Kooperation mit dem Anlagenhersteller Aixtron wurde ein 11 x 2 Zoll Reaktor AIX2400G3-HT (Abb. 1) durch Umbau für Prozess-temperaturen bis zu 1600°C ausgelegt.

AlN-Schichten, die bei den für GaN üblichen Wachstumstemperaturen von $T_g=1200^\circ\text{C}$ abgeschieden werden, sind sehr rau und weisen eine dreidimensionale, facettenreiche Morphologie auf, was die geringe Oberflächenbeweglichkeit der Al-Atome in diesem Temperaturbereich belegt. Abb. 2 zeigt rasterkraftmikroskopische Aufnahmen von AlN-Oberflächen, die bei höheren Temperaturen (1300°C, 1400°C und 1500°C) gewachsen wurden. Bereits bei 1300°C ist die Oberfläche zweidimensional glatt, allerdings weist sie eine hohe Zahl an bis zu 200 nm großen Löchern, sogenannten Pits auf. Deutlich erkennbar ist eine drastische Abnahme der Löcherdichte mit zunehmender Wachstumstemperatur. Die mittlere Rauigkeit der Schicht, die bei der höchsten Temperatur hergestellt wurde, liegt bei ca. 0,4 nm (rms-Wert).

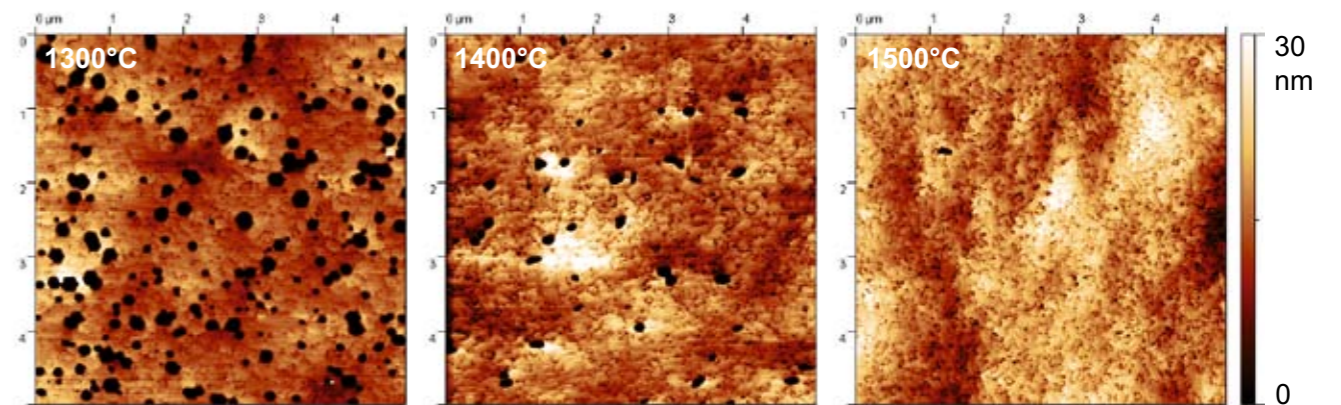


Abb. 2: Rasterkraft-Mikroskopie an AlN-Saphir-Schichten bei Wachstumstemperaturen von 1300°C bis 1500°C. Für die 5 x 5 µm Scans wurden mittlere Rauigkeiten (rms) von 4 nm (1300°C), 1 nm (1400°C) und 0,4 nm (1500°C) bestimmt.
Fig. 2: Atomic Force Microscopy (AFM) scans of AlN layers grown on sapphire at different growth temperatures. The scan area is 5 x 5 µm and rms roughness values of 4 nm (1300°C), 1 nm (1400°C) and 0.4 nm (1500°C) have been determined.

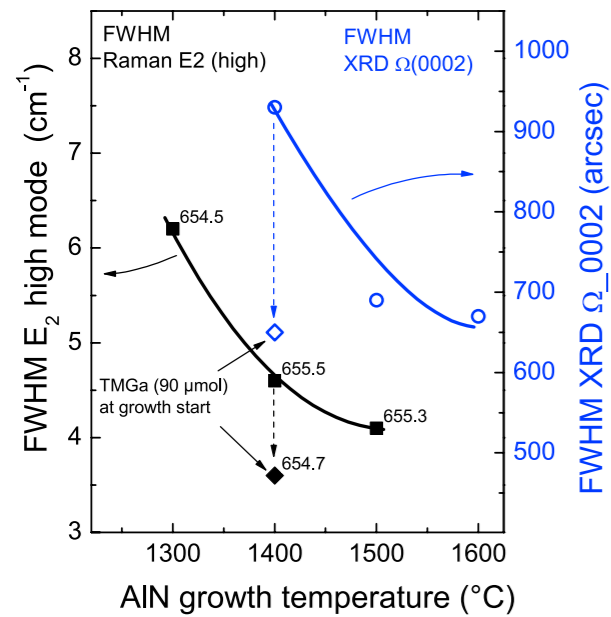
Usually, AlN shows a higher defect density compared to GaN which limits the efficiency of UV LEDs. Therefore, epitaxial growth of AlN with a reduced defect density is a prerequisite to improve output power and efficiency of UV LEDs. In addition, high-quality AlN is the basis for developing high-power transistors capable of operating at elevated temperatures.

One main reason for the higher defect density of AlN is the low mobility of Al atoms on the growing surface. However, this surface mobility can be increased by using higher growth temperatures. In cooperation with Aixtron, a manufacturer of deposition equipment, a 11 x 2 inch multiwafer reactor AIX2400G3-HT (fig.1) has been redesigned to implement process temperatures up to 1600°C.

AlN layers, deposited at usual GaN growth temperatures of about 1200°C, exhibit a rough three-dimensional surface morphology. Fig. 2 shows AlN surface scans measured by atomic force microscopy comparing growth temperatures between 1300°C and 1500°C. Already at 1300°C the surface is two-dimensionally smooth, but it has a high density of large pits. Increasing the growth temperature reduces the pit density drastically. The rms roughness of the layer grown at 1500°C is only about 0.4 nm.

Die glatteren Oberflächen bei höheren Temperaturen sind mit einer höheren kristallinen Perfektion verbunden, wie die verringerten Halbwertsbreiten in der Röntgenbeugung ((0002)-Omega-Scan) als auch der AlN-Ramanmode (E_2 high, 656 nm) in Abb. 3 zeigen.

Eine weitere Verbesserung der kristallinen Qualität wird durch die Zugabe von Ga erreicht. Bereits die Zugabe einer geringen Menge der Ga-Quelle TMGa als Puls zu Beginn des Schichtwachstums führt zu verringerten Halbwertsbreiten, wobei der Einbau von Ga nur während des Pulses nahe der Substrat-Grenzfläche stattfindet. Neben den deutlich verringerten Halbwertsbreiten weisen solche Schichten bereits bei mittleren Wachstumstemperaturen ($T_g=1400^\circ\text{C}$) keine Löcher mehr auf. Diese verbesserten AlN-Schichten bilden die Grundlage für die Entwicklung von kurzwelligen UV-LEDs.



The better surface quality of the layers grown at high temperatures is connected to a higher crystalline perfection. This is shown by reduced XRD and Raman peak width values (fig. 3).

A further improvement of material quality already at reduced temperatures can be obtained by adding Ga in the beginning of AlN growth. The addition of a small amount of TMGa increases the surface mobility of group-III atoms such that surface morphology (no pits already at 1400°C) and structural perfection are improved. These high-quality AlN layers are the basis for the development of short wavelength UV LEDs.

Abb. 3: Halbwertsbreiten der RAMAN E_2 High-Mode und des Omega(0002)-Röntgenbeugungs-Maximums von 0,7 μm dicken AlN-Schichten als Funktion der Wachstumstemperatur

Fig. 3: Full width half maximum values of the RAMAN E_2 (high) mode and the Omega (0002) x-ray diffraction peak of 0.7 μm thick AlN layers grown at different temperatures

Veröffentlichungen // Publications

F. Brunner, H. Protzmann, M. Heuken, A. Knauer, M. Weyers, M. Kneissl, "High-temperature growth of AlN in a production scale 11x2" MOVPE reactor", phys. stat. sol. (c) 5, No. 6, 1799 (2008). Accepted December 2007, published April 2008.

GESCHÄFTSBEREICHE & FORSCHUNG BUSINESS AREAS & RESEARCH

Mikrowellenkomponenten und -systeme
Microwave Components and Systems

GaN-Elektronik
GaN Electronics

Diodenlaser
Diode Lasers

GaN-Optoelektronik
GaN Optoelectronics

Materialien und Prozesse
Materials and Processes

Netzwerke
Networks



Netzwerke: Bildung und Transfer

Als anwendungsorientierte Forschungseinrichtung übernehmen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Ferdinand-Braun-Instituts zunehmend Führungsaufgaben in Forschungs Kooperationen oder institutionellen Netzwerken. Zudem spielt das FBH durch die jahrelange erfolgreiche Koordinationsarbeit innerhalb des Zentrums für Mikrosystemtechnik Berlin (ZEMI) sowie durch die Übernahme des Vorstandsvorsitzes und aktive Mitarbeit in Arbeitsgruppen im regionalen Kompetenznetz OpTecBB e.V. eine führende Rolle in der Technologiepolitik des Landes Berlin. Im Rahmen der kohärenten Innovationsstrategie Berlins vertritt Günther Tränkle das Kompetenzfeld Optische Technologien und Mikrosystemtechnik.

Um diese Aktivitäten zu professionalisieren und eine Schnittstelle zwischen Bildung, Wissenschaft und Wirtschaft zu etablieren, wurde 2007 der Geschäftsbereich Netzwerke eingerichtet. Ausgangspunkt war die Initiierung des ZEMI im Jahr 2001, einem Zusammenschluss Berliner Forschungseinrichtungen, in dem das regionale Forschungs- und Entwicklungspotenzial in der Mikrosystemtechnik vernetzt ist. Um den hohen Aufwand bei der Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte zu minimieren, begleitet ZEMI Unternehmen von der Idee bis zum marktreifen Produkt. Durch die Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen kann die gesamte Wertschöpfungskette abgedeckt werden. Die Geschäftsstelle ist seit 2004 am FBH angesiedelt und hat sich auch durch zahlreiche Forschungs-, Bildungs- und Industrieprojekte zur Interessensvertretung der regionalen Mikrosystemtechnik-Szene entwickelt.

Das interdisziplinäre Team im Geschäftsbereich Netzwerke koordiniert verschiedene Vorhaben zur Vernetzung im Hochtechnologie-Bereich, darunter bereits etablierte Netzwerke in Bildung und Transfer. Darüber hinaus entwickelt die Gruppe umfangreiche, meist administrative, Unterstützungsangebote für Forschungs-, Industrie- und Bildungseinrichtungen sowie für Kolleginnen und Kollegen innerhalb des FBH. Dieses Angebot reicht vom Projektmanagement für wissenschaftliche Projekte, bedarfsgerechten Bildungsangeboten und -dienstleistungen bis hin zur Fördermittelrecherche und -akquise. Nicht zuletzt arbeitet der Geschäftsbereich als zentrale Anlaufstelle und Interessensvertretung für die Mikrosystemtechnik-Branche in der Region.

Networks: Education and Transfer

The staff of the Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) is increasingly taking over executive functions in research cooperations and institutional networks. Furthermore, the application-oriented FBH plays a leading role in technology politics of the State of Berlin since the institute successfully coordinates the Center for Microsystems Technology (ZEMI) Berlin for many years and cooperates with regional competence networks such as OpTecBB e.V. In addition, Günther Tränkle was elected chairperson of OpTecBB and represents the Berlin competence field of optical and microsystems technologies (MEMS) within the coherent innovation strategy.

In 2007, the Business Area Networks was established in order to professionalize these activities and to establish an interface between education, science and economy. Starting point was the founding of ZEMI in 2001, an association of research institutes in Berlin bundling the regional competence and infrastructure in microsystems research and development. To minimize huge efforts at the development of microsystems products, ZEMI supports companies from the idea to marketable products. The whole value-added chain can be covered by this cooperation. Since 2004, the ZEMI branch office is located at the FBH and has emerged as a representative for the regional microsystems scene by a great range of projects in research, education and industry.

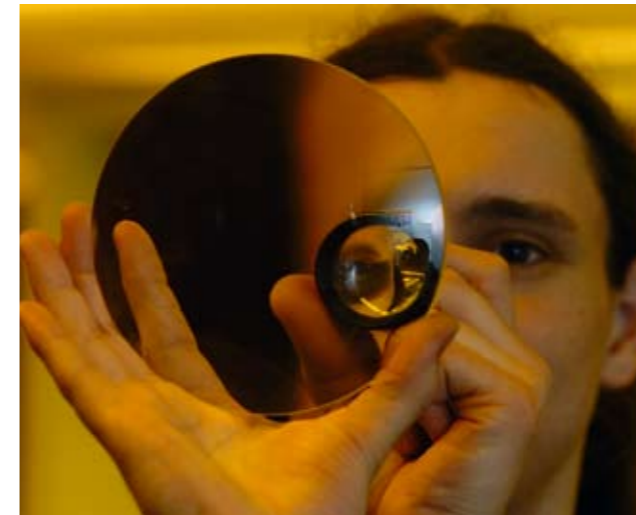
The interdisciplinary team in the Business Area Networks coordinates several networking projects in the high-tech field including several well-established education and transfer networks. In addition, the group offers comprehensive, mostly administrative services to support research, industrial and education institutions as well as colleagues within the FBH. These services range from project management for scientific projects, demand-oriented educational offers and services up to the inquiry and acquisition of subsidies. Last but not least, the business area operates as a central contact and represents interests of the MEMS branch in the region.

Aktiv in der Bildung

Die jüngste Erfolgsgeschichte: das Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin

Aufbauend auf den Erfahrungen des MANO-Netzwerks (Mikrosystemtechnik-Ausbildung in Nord-Ostdeutschland) nahm im Mai 2007 das Ausbildungsnetzwerk Hochtechnologie Berlin (ANH Berlin) seine Arbeit am FBH auf. Ziel ist die Sicherung des gewerblich-technischen Fachkräftenachwuchses in Berlin für die Branchenschwerpunkte Mikrosystemtechnik, Optische Technologien und Nanotechnologie.

Trotz steigendem Bedarf an gut ausgebildeten Facharbeiterinnen und Facharbeitern bilden Berliner Hochtechnologiebetriebe deutlich weniger aus als andere Branchen. Den Unternehmen und Forschungseinrichtungen fehlen häufig die nötigen personellen oder finanziellen Ressourcen oder sie sind so hoch spezialisiert, dass sie nicht alle Ausbildungsinhalte abdecken können.



High-Tech-Ausbildung in optischen Technologien
High-tech training in optical technologies

Um diese Hemmnisse zu überwinden, bietet ANH Berlin Unternehmen und Forschungseinrichtungen Unterstützung bei der betrieblichen Ausbildung an. Ein Schwerpunkt ist die Beratung zu passenden oder neuen Ausbildungsberufen. Sehr erfolgreich gestaltet sich hierbei die enge Zusammenarbeit mit den zwei Berufsschulen, der Lise-Meitner-Schule und dem Oberstufenzentrum Informations- und Medizintechnik,

Active in Education

Latest Success Story: The High-Technology Education Network ANH Berlin

Based on the experience of the MANO network (Mikrosystemtechnik-Ausbildung in Nord-Ostdeutschland), the "High-Technology Education Network" (ANH Berlin) started in May 2007. Aim is to safeguard commercial and technical skilled trainees in Berlin's industry in microsystems, optical, and nano technology.

Despite the increasing need for well-trained employees, high-technology firms in Berlin train considerably less than in other industrial sectors. Companies and research institutes frequently lack the necessary human and financial resources. Often they are so highly specialized, that they can not cover all training content.



Präsentation der regionalen Potenzialanalyse des ANH Berlin
Presentation of the regional potential analysis of ANH Berlin

In order to overcome these obstacles, ANH Berlin supports companies and research institutes in their vocational training. One focus is on consulting service for adequate or new vocational trainings. In this regard, the close collaboration with two vocational schools responsible for the education of high-technology skilled workers, the Lise Meitner School and the Oberstufenzentrum (vocational training college)

die für den Berufsschulunterricht der hochtechnologieaffinen Berufe zuständig sind. Die direkte Einbindung von Berufsschullehrern in die Arbeiten des ANH Berlin erweist sich besonders bei der Beratung von Betrieben hinsichtlich passender Ausbildungsinhalte als sehr sinnvoll.

Darüber hinaus wird den Betrieben ein externes Bewerbungsmanagement angeboten, das administrative und beratende Tätigkeiten wie zum Beispiel Stellenausschreibungen, Sichtung der Bewerbungsunterlagen und Beratung bei der Auswahl der Auszubildenden umfasst. Diese Angebote werden speziell von kleinen Betrieben und solchen, die zum ersten Mal ausbilden, genutzt. Ergänzend werden durch das Netzwerk Ausbildungskooperationen initiiert und vermittelt, um auch hochspezialisierte Unternehmen in die Lage zu versetzen, eigenen Fachkräftenachwuchs auszubilden. Bei einer Ausbildungskooperation schließen sich zwei oder mehrere Unternehmen zusammen, um gemeinsam alle Ausbildungsinhalte abdecken zu können.

Bereits für das Ausbildungsjahr 2007 konnten durch diese Unterstützungsangebote und durch die Nutzung der am FBH vorhandenen Netzwerke 24 zusätzliche Ausbildungsplätze geschaffen werden. Gemeinsam mit dem am Institut angesiedelten Schülerlabor MicroLAB und Partnern aus dem MANO-Netzwerk engagiert sich das ANH Berlin zusätzlich auf Messen und Veranstaltungen und informiert über die zukunfts-trächtigen Ausbildungsmöglichkeiten in den Hochtechnologien oder vermittelt freie Ausbildungsplätze. Das ANH Berlin wird im Rahmen des JOBSTARTER-Programms mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der Europäischen Union (Europäischer Sozialfonds) gefördert.

Den Nachwuchs für High-Tech begeistern: Mikrowelten-Ausstellung in Berlin

Für Mai und Juni 2007 holte MANO gemeinsam mit dem FBH die Ausstellung "Mikrowelten – Zukunftswelten: die unsichtbare Revolution" des BMBF nach Berlin. Bildungs-Staatssekretär Eckart R. Schlemm und Günther Tränkle eröffneten die Ausstellung im Spektrum des Deutschen Technikmuseums in Berlin, die hier insgesamt vier Wochen zu erleben war.

for Information and Medical Technology, developed very successfully. The direct integration of vocational school teachers in the work of ANH Berlin proved to be very productive especially when advising companies on adequate educational content.

Furthermore, ANH Berlin offers external recruiting management, which includes administrative and consultative services, such as job advertisement, perusal of application documents and shortlisting of job candidates. Especially small companies and those who train for the first time use these services. Additionally, the network initiates and procures educational cooperations, in order to enable highly specialized companies to train qualified employees. Within such a regional cooperation, two or more companies support one another in covering all educational content. Already in 2007, ANH Berlin succeeded in initiating 24 additional apprenticeships based on existing contacts and networks of the FBH. Together with the school laboratory MicroLAB, which is located at the institute and partners from the MANO network, ANH Berlin got additionally involved in fairs and events informing pupils about education opportunities in high technology and open training positions. ANH Berlin is supported within the JOBSTARTER program by the Federal Ministry for Education and Research and the European Union.



Inspiring Young People for High-Tech: Micro Worlds Exhibition in Berlin

In May and June 2007, MANO and FBH jointly managed to bring the Micro Worlds Exhibition "Mikrowelten-Zukunftswelten: die unsichtbare Revolution" to Berlin. Education Secretary Eckart R. Schlemm and Günther Tränkle opened the four-week exposition in the Berlin science center Spektrum.

Die interaktive und multimediale Ausstellung lud kleine und große Forscherinnen und Forscher auf eine spannende Entdeckungsreise in die Welt der kleinen Dimensionen ein. An verschiedenen Mitmachstationen konnten sie selbst ausprobieren, wie Mikrosysteme in den Bereichen Mobilität, Life Science oder Sport und Freizeit funktionieren. Über 15.000 Besucher/-innen nutzten die Gelegenheit um anschaulich zu erfahren, was Mikrotechnologie alles kann und welche neuen Anwendungsgebiete in der Zukunft noch zu erschließen sind.



Eröffnungsrundgang der Ausstellung
Opening tour at the exhibition

Akademische Nachwuchsförderung und Weiterbildung: Microsystems Summer School 2007

Im September 2007 organisierte die ZEMI-Geschäftsstelle zum zweiten Mal die Microsystems Summer School am Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort Berlin-Adlershof. Die fünftägige Sommeruni wurde mit Unterstützung der ZEMI-Partner für Unternehmensmitarbeiter/-innen sowie Studierende, Diplomanden/-innen und Doktoranden/-innen aus Fachhochschulen und Universitäten in Deutschland veranstaltet. ZEMI hat mit seiner Microsystems Sum-

The interactive and multimedia exposition invited little and grown-up explorers to discover the world of small dimensions. At various stations, visitors experienced how MEMS operate in mobility and life science as well as in sports and leisure time. More than 15,000 visitors took the chance to experience the ability of today's micro technology and to discover future applications.



Erforschung der Mikrowelten
Investigation of micro worlds

Academic Advancement and Further Education: Microsystems Summer School 2007

In September 2007, the ZEMI branch office, supported by the ZEMI partners, organized its second Microsystems Summer School at the City of Science, Technology and Media in Berlin-Adlershof. The Summer School addressed staff members, students, graduates and Ph.D. students.

With the Microsystems Summer School, ZEMI made the regional existing competencies in MEMS accessi-

mer School die regional vorhandenen hohen Kompetenzen in der Mikrosystemtechnik als bundesweites Angebot für die akademische Weiterbildung nutzbar gemacht. 27 Teilnehmende nahmen die Mischung aus Vorträgen, Laborführungen und Versuchen wahr und beurteilten die Veranstaltung als sehr informativ und erfolgreich. Um die Microsystems Summer School noch interessanter und industrienäher zu gestalten, werden zukünftig thematisch verwandte regionale Unternehmen in die Ausrichtung der Sommeruni aktiv einbezogen. Zusätzlich sollen 2008 Veranstaltungen zum Thema WideBaSe (Wide-Bandgap-Semiconductors) angeboten werden.



ble as a nationwide offer for further academic education. 27 attendees participated in the mix of lectures, laboratory tours and experiments and evaluated the event as very informative and successful. For the future, regional companies shall be involved with thematically related topics.



Sommeruni 2007 am FBH
Summer school 2007 at the FBH

Bildung technologieübergreifend denken: Kongress "Aus- und Weiterbildung in Hochtechnologiefeldern"

Im Rahmen der im Geschäftsbereich Netzwerke angesiedelten Koordination der Aus- und Weiterbildungsnetzwerke für die Mikrosystemtechnik (AWNET) wurde der nationale Kongress "Aus- und Weiterbildung in Hochtechnologiefeldern – Fachkräftesicherung in Neuen Technologien" organisiert. Ende November trafen sich an zwei Tagen 150 Teilnehmende aus Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Hochschulen, Ministerien, Projektträgern, Arbeitsagenturen und Schulen, um über anstehende Herausforderungen in der Hochtechnologie-Bildung zu beraten. Von der Nachwuchssicherung über die berufliche Erstausbil-

Education across Technological Boundaries: Conference "Vocational Training and Further Education in High-Technology Fields"

FBH's Business Area Networks, also responsible for the coordination of the AWNET network (education and training networks for microsystems technology), organized the nationwide conference "Vocational Training and Further Education in High-Technology Fields". At the end of November, 150 participants from companies, research institutes, universities, ministries, project executing organizations, job centers and schools, met to discuss the upcoming challenges in high-technology education. In workshops the attendees shared experiences and gathered information on good practice examples in the fields

of recruiting, vocational training, tertiary education, further education as well as topics like teaching material and internationalization. The participants subsequently developed recommended actions for future activities.

Lectures and discussions benefited from many of the experiences gained within ANH Berlin, MANO, the school laboratory MicroLAB, and FBH's participation in public events such as Night of Sciences and Girls' Day. One result of the conference will be a position paper about education and training for high-technology fields summarizing the experiences and recommended actions. Further, all involved technology networks in microsystems, optical and nano technology plan to coordinate activities and to continuously discuss educational issues beyond technological boundaries.

Durch die Arbeiten im Rahmen von ANH Berlin, MANO, dem Schülerlabor MicroLAB aber auch der Beteiligung des FBHs an öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen wie der Langen Nacht der Wissenschaften und dem Girls' Day konnten viele der hier gesammelten Erfahrungen in die Vorträge und Diskussionen einfließen. Ein Ergebnis wird ein Positionspapier zur Aus- und Weiterbildung in Hochtechnologiefeldern sein, das die Erfahrungen und Handlungsempfehlungen zusammenfasst. Darüber hinaus planen die beteiligten Technologienetze der Mikrosystemtechnik, der Optischen Technologien und der Nanotechnologie Aktivitäten aufeinander abzustimmen und die technologieübergreifende Diskussion von Bildungsfragen regelmäßig zu wiederholen.

of recruiting, vocational training, tertiary education, further education as well as topics like teaching material and internationalization. The participants subsequently developed recommended actions for future activities.



Eröffnung des AWNET-Kongresses
Opening of the AWNET congress

Erfolgreicher Transfer

Successful Transfer

Verlängert: EMiL-NET geht in die zweite Phase

Das Netzwerk EMiL-NET (Entwicklung von Mikrosystemtechnik für innovative Lebensmittelerzeugung) ist das Bindeglied zwischen Akteuren aus der Mikrosystemtechnik und der Lebensmittelerzeugung. Es kontaktiert Unternehmen, Multiplikatoren und weitere Know-how-Träger im Erzeuger- und Verarbeiterbereich der Nahrungsgüterwirtschaft und kommuniziert die aufgegriffenen Themenstellungen in das Netzwerk. 2007 wurde die zweite Phase des Netzwerks EMiL-NET, dessen Koordination im Geschäftsbereich Netzwerke verankert ist, erfolgreich eingeleitet.

Mit der in EMiL-NET integrierten Kompetenzvielfalt – sowohl physikalisch-ingenieurwissenschaftliche wie auch biowissenschaftliche Expertisen sind präsent – verfügt das Netzwerk über beste Voraussetzungen für innovative mikrosystemtechnische Lösungen mit hoher Marktrelevanz in den Handlungsfeldern der agrarischen Primärerzeugung und Lebensmitteltechnologie.

Ein wichtiges Element der Netzwerkarbeit ist der interne Informationstransfer. Elementare Voraussetzungen für die erfolgreiche Zusammenarbeit der heterogenen Netzwerkpartner sind Transparenz und Verständnisenwicklung für die fachlich entfernten Teildisziplinen. Dabei müssen auch deren unterschiedliche Positionen in der Wertschöpfungskette bis zum Endanwender beachtet werden. Durch impulsgebende Studien und Vorträge externer Wissenschaftler für die Netzwerkpartner konnten Potenziale und Synergien für komplexe Technologietransformationen aufgedeckt werden.

Entsprechend den Richtlinien der BMWi-Initiative "Netzwerkmanagement-Ost" gilt es, das Netzwerk zu stabilisieren, auszubauen und die Zukunftssicherung des wirtschaftsorientierten Netzwerkes innovativer ostdeutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen vorzubereiten. Zwischenzeitlich sind 15 Partner aus den Wirtschafts- und Wissenschaftsbereichen Mikrosystemtechnik und Nahrungsgüterwirtschaft der Region Berlin-Brandenburg an der Umsetzung dieses Vorhabens beteiligt.

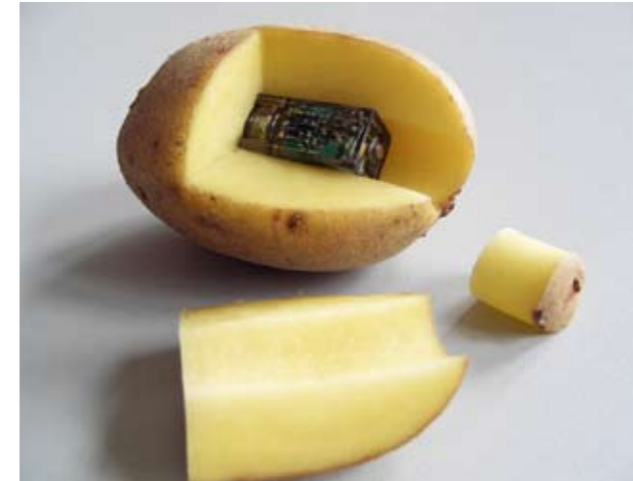
Extended: EMiL-NET goes into the Second Round

The network EMiL-NET (development of microsystems technology for innovative food production) connects partners from MEMS and food production. EMiL-NET gets in touch with companies, multipliers and further stakeholders in the area of food production and food processing communicating the issues thereby raised into the network. In 2007, the second grant period of EMiL-NET, which is a part of FBH's Business Area Networks, was successfully introduced.

EMiL-NET is distinguished by the different competencies provided within the network, ranging from physics and electrical engineering to bio scientific expertise. The network thus features the best conditions for the development of innovative microsystems solutions with a high market relevance in agricultural production and food technology.

One essential element within networking is internal information transfer. Transparency and mutual understanding for even distant fields of expertise as well as different functions within the value chain are substantial preconditions for successful cooperation of the heterogeneous network partners. Potentials and synergies for complex technology transformation could be discovered by means of studies and lectures.

According to the principles of the German initiative "Network Management East", the network is to be stabilized and strengthened, preparing appropriate steps to securing the future of the economy-oriented network of innovative east German companies and research institutions. Meanwhile, 15 regional partners from Berlin and Brandenburg are involved in the project.



Datenlogger zur Messung von Stoßbelastungen
Data logger measuring impact loads



Spektroskopische Messung der Fruchtreife
Spectroscopic measurement of the ripeness of fruit

Themenspezifisch und verwertungsorientiert: das Netzwerk "Leibniz-WideBaSe-Research"

In Berlin und Brandenburg befindet sich eine europaweit einmalige Kompetenz in der Forschung und Entwicklung zu Halbleitern mit großer Bandlücke (Wide-Bandgap-Semiconductors). Vor diesem Hintergrund initiierten zwei Institute der Leibniz-Gemeinschaft, das FBH und das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), im Herbst 2007 das verwertungsorientierte Netzwerk "Leibniz-WideBaSe-Research". Fünf weitere Leibniz-Einrichtungen sowie mehrere Institute der Berliner Universitäten forschen in Berlin und Brandenburg zu Halbleitern mit großer Bandlücke. Etliche, vor allem kleine und mittelständische Unternehmen, entwickeln und vermarkten Produkte auf dieser Basis. Zwischen der Vielzahl von Akteuren, die die Wertschöpfungskette zu WideBaSe abdecken, bestehen bisher meist nur bilaterale Kontakte. Daher soll unter der Federführung von FBH und IKZ aus den vorhandenen Forschungskompetenzen ein entsprechendes Netzwerk aufgebaut und nachhaltig etabliert werden.

In einem ersten Schritt wurde "Leibniz-WideBaSe-Research" durch den Ausbau der Infrastruktur an IKZ und FBH zur Züchtung von AlN-Kristallen und AlGaN-Epitaxieschichten gestartet. Auf dieser Materialbasis können exemplarisch Grundlagenentwicklungen für LEDs im UV-Bereich durchgeführt werden, die insbesondere für die Entkeimung von Oberflächen und

Topic-Centered and Application-Oriented: "Leibniz-WideBaSe-Research"

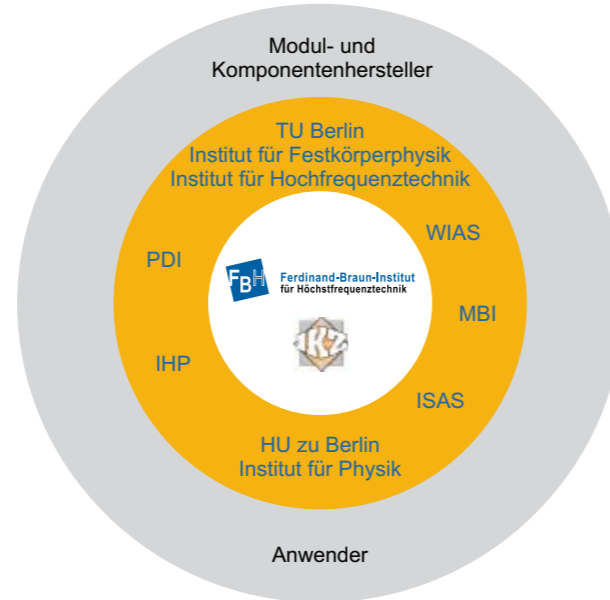
Berlin and Brandenburg provide a Europe-wide unique competence in research and development of semiconductors with large band gaps (Wide-Bandgap-Semiconductors). Thus, two institutes of the Leibniz Association, FBH and Leibniz-Institute for Crystal Growth (IKZ), initiated the application-oriented network "Leibniz-WideBaSe-Research" in autumn 2007. Five further Leibniz institutions and several institutes of Berlin universities conduct research on semiconductors with large band gap. Especially small and medium-sized enterprises develop and market the respective products. Up to now, between many of these players covering the whole value chain of WideBaSe mostly bilateral contacts have been established. Hence, based on the existing research competence and lead-managed by FBH and IKZ, a network shall be established.

As a first step, "Leibniz-WideBaSe-Research" started by building up the necessary infrastructure at IKZ and FBH for the growth of AlN crystals and AlGaN epitaxial layers. On this material base exemplary basic developments for LEDs in the UV spectral range can be realized, which are especially attractive for surface disinfection and water purification as well as optical sensors for the detection of organic, inorganic and biological substances. Subsequently, a common roadmap with other Leibniz institutes and universities in Berlin and Brandenburg shall be developed.

Wasser sowie für die optische Sensorik von organischen, anorganischen und biologischen Substanzen interessant sind. Darauf aufbauend sollen mit den weiteren Berliner und Brandenburger Leibniz-Instituten und Universitäten die Forschungsarbeiten im Netzwerk abgestimmt und eine gemeinsame Roadmap entwickelt werden.

Für 2008 ist die Etablierung eines regionalen Wachstumskerns "Berlin WideBaSe Applications" geplant. Unter der Federführung von mit dem Netzwerk kooperierenden Berliner Unternehmen soll die nachhaltige Nutzung der in der Berliner und Brandenburger Wissenschaft erzielten Forschungsergebnisse gewährleistet werden.

For 2008, it is projected to establish a regional center of growth "Berlin WideBaSe Applications". Managed by the companies cooperating within the network, sustainable use of the research results achieved in Berlin and Brandenburg shall be ensured.



Struktur von Leibniz-WideBaSe-Research
Structure of Leibniz-WideBaSe-Research

International in Forschung und Bildung kooperieren: Beteiligung am "Forschungsmarketing Südkorea"

Im Rahmen der BMBF-Ausschreibung "Forschungsmarketing Südkorea" übernahm das FBH in zwei ZEMI-Vorhaben eine zentrale Rolle: "Aufbau einer Forschungs- und Entwicklungskooperation auf dem Gebiet Optischer Mikrosysteme" und "Markterschließung für Aus- und Weiterbildungsangebote zur Mikrosystemtechnik". Für diese Vorhaben wurden vorhandene Kontakte aktiviert sowie strategische Partnerschaften mit Akteuren aus Forschung, Bildung und Wirtschaft in Korea auf- und ausgebaut.

Während das F&E-Vorhaben einen besseren Zugang zu anwendungs- und industrienaher Forschung in Korea anstrebte, zielte das Bildungsvorhaben auf eine

International Cooperations in Research and Education: "Research Marketing South Korea"

Within the framework of BMBF's "Research Marketing South Korea" the FBH took over a central role within two ZEMI projects: "Setup of a research and development cooperation in the field of optical microsystems" and "market development for offers in vocational training and further education in microsystems technology". Therefore, existing contacts were mobilized and new strategic partnerships with stakeholders from research, education and economy in Korea were established and further developed.

Whereas the research and development project was geared towards better access to application-oriented and industry-related research in Korea, the education

gemeinsame deutsch-koreanische Entwicklung von Bildungsdienstleistungen der Mikrosystemtechnik für einen internationalen Markt ab.

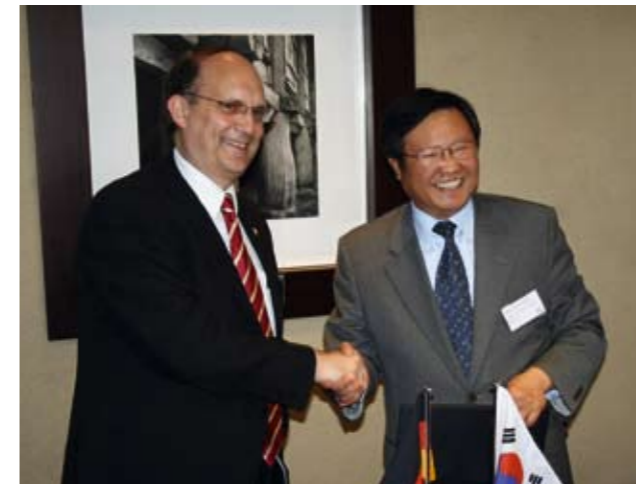
Eine Auftaktveranstaltung des BMBF in Seoul und die Präsentation der Forschungs- sowie Aus- und Weiterbildungsaktivitäten in Deutschland weckten bei mehreren koreanischen Teilnehmern aus Forschung und Industrie Interesse an Kooperationen mit den ZEMI-Partnern. Dies wurde später durch die Unterzeichnung von Memoranden manifestiert. Günther Tränkle gehörte zur deutschen Delegation unter Leitung der Ministerin für Bildung und Forschung, Annette Schavan. Im Verlauf des Vorhabens fanden gegenseitige Besuche der Technologie- und Industrieparks in Changwon und Gwangju sowie in Berlin-Adlershof statt.

Das "Forschungsmarketing Südkorea" führte insbesondere beim FBH-Spin-off eagleyard Photonics GmbH zu wirtschaftlichen Kooperationen und Geschäftsvereinbarungen.

project aimed at establishing joint German-Korean educational offers for MEMS.

A kick-off event of the BMBF in Seoul and the presentation of German research and education activities attracted the interest of Korean participants in cooperation with ZEMI partners, confirmed by MOUs. Günther Tränkle was a part of the German delegation headed by the Minister for Education and Research, Annette Schavan.

During the project, representatives from the technology and industrial parks in Changwon, Gwangju and Berlin-Adlershof visited one another. Especially for the FBH spin-off eagleyard Photonics GmbH, the "Research Marketing South Korea" led to business agreements and cooperations.



Günther Tränkle und der Präsident des Changwon Clusters Sang-Chun Lee unterzeichnen ein Memorandum
Günther Tränkle and the President of Changwon Cluster Sang-Chun Lee signing a MOU



Besuch der deutschen Delegation in Südkorea unter Leitung von Annette Schavan
South Korea visit of the German delegation headed by Annette Schavan

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

Bilder & Grafiken // Images & Graphics

EMIL-Partner (p. 131 [1], 137 [1, 2])
Forschungsverbund Berlin (p. 37 [2])
Ralf Günther (p. 33 [1])
Klockenhoff/Schmidt (p. 20)
Privat (p. 28 [1,2])
Marion Schönenberger (p. 2, 22, 31)
Berhard Schurian (p. 1, 7, 8, 10 [1-3], 12 [1], 15, 19, 41, 49, 63,
79, 85, 101, 107, 109, 114, 116 [2], 117, 120)
Spektrum (p. 133 [1, 2])
Tesat Spacecom (p. 24)
Hans Wiedl (p. 12 [2])
Frank Wojciechowski (p. 29)
ZEMI (p. 129, 139 [1, 2])
weitere // further: FBH

Layout & Satz // Layout & Typesetting

nana giorgadze – Studio Ralf Grömminger

Druck // Printing

quadimo GmbH & Co. KG

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 2008