

Jahresbericht 2006

Annual Report 2006

FBH

VORWORT PREFACE



Für das Ferdinand-Braun-Institut gab es im Jahr 2006, im fünfzehnten Jahr seines Bestehens, eine Reihe von überzeugenden Ergebnissen und zukunftsweisenden Entwicklungen, von denen ich hier nur einige erwähnen will:

Bei der Erforschung von Hochleistungsdiodenlasern haben wir erneut Bauelemente mit sehr guten Kenndaten demonstriert. Beispiele sind 940 nm-Minibarren mit einer optischen Leistung von 200 W und 980 nm-DBR-MOPAs mit einer Ausgangsleistung von 8 W, die im Grundmode emittieren. Optimierte 940 nm-Laserbarren liefern mit 73% einen Bestwert beim Konversionswirkungsgrad und bestätigen damit unsere führende Rolle in diesem Forschungsfeld. Diese Position soll auch durch eine Nachwuchsforschergruppe im Themenfeld „Hybride Diodenlasersysteme“, die das BMBF über fünf Jahre fördert, gesichert bleiben.

Die zügige Umsetzung unserer Forschungsergebnisse in der Optoelektronik ist durch die enge und beständige Kooperation mit unseren strategischen Industriepartnern und Ausgründungen gewährleistet. In 2006 hat die Jenoptik Diode Lab GmbH, die 2002 aus dem FBH ausgegründet wurde, ihre neue Produktionsstätte in Adlershof eröffnet. Seit dem Sommer fertigen dort 40 Mitarbeiter auf der Basis der FBH-Technologie Hochleistungslaserbarren, die weltweit zu den Spitzenprodukten gehören. Um diese Stellung langfristig auszubauen, vergibt Jenoptik Forschungsaufträge an das FBH.

Parallel haben wir in 2006 unsere Forschungsarbeiten zur GaN-Technologie systematisch und in großer Breite ausgebaut. Es stehen uns jetzt zwei MOVPE-Anlagen zur Epitaxie von InGaAIN-Schichtkristallen zur Verfügung. Sie ergänzen unsere Ausrüstung zur Gasphasenepitaxie von Galliumnitrid-Substraten, die wir schon länger betreiben. Damit verfügen wir am FBH über eine

In 2006, in the fifteenth year of its existence, Ferdinand-Braun-Institut obtained numerous good results and new promising developments showed up, a few of which I would like to mention here:

In the field of high-power diode lasers we again demonstrated devices with excellent performance. Examples are 940 nm mini bars with an optical output power of 200 W and 980 nm DBR MOPAs with an output power of 8 W, being emitted in single-mode operation. With 73% conversion efficiency, optimized 940 nm laser bars deliver a record value and hence certify our leading role in this research area. In order to assure our position in this field, amongst others a BMBF funded junior research group “hybrid diode laser systems” was established.

The close and consistent cooperation with our strategic industrial partners and spin-offs allow for the fast transfer of research results in optoelectronics. In 2006, Jenoptik Diode Lab GmbH, spun-off in 2002 from the FBH, opened up its new production facility in Adlershof. Since summer 40 employees manufacture high-power laser bars, which are based on FBH's technology and acknowledged as worldwide leading products in this field. Aiming to strengthen this position, Jenoptik concludes research contracts to the FBH.

At the same time, in 2006 we strengthened our research on GaN technology systematically and to a great extent. Now, two MOVPE systems for epitaxy of InGaAIN layers are available. They add to our equipment for gas phase epitaxy of gallium-nitride substrates, which we already run longer. Consequently, FBH provides an infrastructure on the epitaxy of nitrides which is unique in Europe, from the substrate crystal up to the functional layers for laser diodes and transistors.

in Europa einzigartige Infrastruktur zur Epitaxie von Nitriden vom Substratkristall bis zur funktionalen Schicht für Laserdioden und Transistoren.

Als große Verstärkung in diesem Forschungsfeld hat sich wie erhofft die enge Kooperation mit Michael Kneissl herausgestellt. Er wurde im Spätsommer 2005 an die TU Berlin berufen und leitet am FBH eine Arbeitsgruppe als Abteilungsleiter. Am FBH ist er für die Themen im Anwendungsbereich der GaN-Optoelektronik verantwortlich, also für die Realisierung von blauen und ultravioletten Lichtquellen. So konnten im letzten Herbst unter seiner Leitung unsere Experten und seine Doktoranden von der TU Berlin eine erste optisch gepumpte GaN-Laserdiode bei 405 nm realisieren. Seit wenigen Wochen liegen die ersten elektrisch gepumpten Laserdioden vor. Damit haben wir in dieser zukunftsweisenden Kooperation die Grundlage für den Ausbau unseres Forschungsfeldes GaN-Optoelektronik gelegt.

Seit Jahren beruhen wesentliche Teile unserer Arbeiten im Forschungsfeld Mikrowellentechnik ebenfalls auf der GaN-Technologie. Durch die eigene Epitaxie besteht jetzt die Möglichkeit dieses Feld mit noch größerem Nachdruck zu bearbeiten. Bei den Mobilfunkfrequenzen um 2 GHz haben wir Single-Chip Power-Bars demonstriert, die eine Leistung von 100 W im Dauerstrich liefern. Im X-Band liegen sehr kompakte Leistungs-MMICs mit einer Ausgangsleistung von 16 W bei einer linearen Verstärkung von 18 dB vor. Für Frequenzen von 3 - 7,5 GHz haben wir einen gegenüber hohen Eingangsleistungen extrem robusten rauscharmen Verstärker realisiert, der sehr einfache Empfängerstrukturen ohne Schutzschaltungen ermöglicht. Durch die enge Kooperation mit Lucent und United Monolithic Semiconductors ist auch hier der Transfer unserer Forschungsergebnisse gewährleistet. Mit der Ausgründung der Berlin Microwave Technologies AG (BeMiTec AG) im Januar 2006 nutzen wir zusätzlich die Chancen, die der internationale Markt für Mikrowellen-Leistungsbaulemente bietet.

Unsere Forschungsergebnisse werden auch immer häufiger in Anwendungen der Grundlagenforschung transferiert. Ein Beispiel hierfür ist unsere Kooperation mit dem Max-Born-Institut bei der Realisierung eines Table-top Röntgenlasers, für den das FBH neuartige gepulste Diodenlaserstacks entwickelt.

Auch die Institutsgebäude selbst haben im vergangenen Jahr den letzten Schliff erhalten. Mit der Installation einer 640 m² großen Solarwand an der Südwest-Fassade unserer Reinraum-Halle im Dezember 2006 wurden die Bau- und Renovierungsarbeiten am FBH, die über lange Jahre im laufenden Betrieb durchgeführt werden mussten, abgeschlossen. Die bauliche Infrastruktur am

A great benefit in this research area, proved to be the close cooperation with Michael Kneissl. In late summer 2005, he was appointed at TU Berlin and is leading a work group as a department head at FBH in parallel. At our institute, he is responsible for application-oriented topics in GaN optoelectronics, i.e. for the realization of blue and ultraviolet light sources. Under his guidance, our experts and his students from the TU Berlin developed a first optically pumped GaN laser diode at 405 nm last autumn. Since a few weeks the first electrically pumped laser diodes are available. With this future-oriented cooperation we laid the basis for the further extension of our research field GaN optoelectronics.

Since years, essential parts of our work in microwaves are based on GaN technology too. Providing our own epitaxy is now offering the possibility to even stronger emphasize this field. At mobile frequencies of around 2 GHz we have demonstrated single chip power bars, delivering an output power of 100 W in continuous wave operation. In the X-band range, we provide compact power MMICs with an output power of 16 W with linear gain of 18 dB. For frequencies of 3 - 7.5 GHz we developed a low-noise amplifier which is extremely robust against high input-powers and allows for very simple receiver structures without protective circuits. Transfer of our research results in this field is assured by the close cooperation with Lucent and United Monolithic Semiconductors. Additionally, we take the chances in the international markets for microwave power devices with our spin-off Berlin Microwave Technologies AG (BeMiTec AG), which we founded in January 2006.

Increasingly, our research results are transferred into applications of basic research. One example is our cooperation with the Max-Born-Institut in the realization of a table-top X-ray laser, where FBH develops novel pulsed diode laser stacks.

Even FBH's buildings were polished finally within the last year. With the installation of a 640 sqm huge solar panel at the southwest cladding of our clean room hall in December 2006, construction and renovation work at the FBH was completed after a long period, where it had to be executed during daily affairs.

Meanwhile, infrastructure at the FBH is excellent. By the constant increase of employees within the last two years – more than 180 colleagues are in the meantime working for the FBH – the institute's space is running short again. For this reason, an additional laboratory and office building appears not only to be desirable, but also necessary.

FBH ist damit inzwischen ausgezeichnet. Durch den kontinuierlichen Zuwachs an Mitarbeitern in den letzten beiden Jahren – am FBH arbeiten inzwischen über 180 Kolleginnen und Kollegen – stößt das Institut allerdings räumlich bereits wieder an seine Grenzen, so dass ein zusätzliches Labor- und Bürogebäude nicht nur wünschenswert, sondern auch notwendig erscheint.

All die positiven Entwicklungen des letzten Jahres wären nicht möglich gewesen ohne die zahlreichen Unterstützer und Förderer des FBH. Ich möchte daher allen danken, die zum Erfolg des Ferdinand-Braun-Instituts beitragen haben und noch dazu beitragen. Dazu gehören vor allem die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts, die mit ihren Fertigkeiten und ihrem großen Engagement dafür beständig die Grundlage legen. Auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Geschäftsführung und der Gemeinsamen Verwaltung des Forschungsverbundes Berlin e.V. danke ich für ihre kompetente administrative Begleitung unserer Forschungsarbeiten.

Unseren Förderern im Land Berlin und im BMBF möchte ich für ihr Vertrauen und ihre finanzielle Unterstützung danken, die sich nicht zuletzt in den stabilen finanziellen Verhältnissen des FBH widerspiegelt. Unseren Beiratsmitgliedern gebührt hohe Anerkennung für die Beratung in strategischen Fragen und bei der Qualitätssicherung unserer Ergebnisse.

Unser Dank gilt auch unseren Kooperationspartnern in den Hochschulen, insbesondere in der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik und in den Physikalischen Instituten der Technischen Universität Berlin, mit denen wir nicht nur über gemeinsame Forschungsarbeiten sondern auch auf dem Weg zu einem Exzellenzcluster und durch vielfältige Beiträge in der Lehre eng verbunden sind. Wir haben ein vitales Interesse daran, diese Zusammenarbeit in der Zukunft weiter zu vertiefen. Erleichtert wird dies über die neue Autobahn, durch die Adlershof und der Campus der TU Berlin inzwischen beinahe zu Nachbarn geworden sind.

Last, but not least möchten wir unseren Kooperationspartnern in den Forschungsinstituten und in der Industrie für die fruchtbare Zusammenarbeit danken. Diese Partner nutzen nicht nur unsere Ergebnisse, sondern liefern uns auch immer wieder neue Ziele für unsere anwendungsorientierte Forschung.

Berlin, im Februar 2007



Günther Tränkle

Positive developments within the last year would not have been possible without the large amount of supporters of FBH. I would like to thank all, who have founded the success of the Ferdinand-Braun-Institut and are still making their contributions. This are especially the colleagues of the institute, who constantly form the basis for our achievements with their abilities and great commitments. I am also grateful for the administrative support by the employees of the Forschungsverbund Berlin e.V.

I would like to thank our promoters from the State of Berlin and the BMBF for their confidence and financial support, which is not least reflected by FBH's stable financial situation. High credit has to be given to our scientific board for its advice in strategic issues and for its help to assure the quality of our work.

We would like to express our gratitude to our cooperation partners in the universities, especially the Faculty for Electrical Engineering and Computer Science and the Physical Institutes of Technische Universität Berlin. We are not only closely connected via joint research but also by various contributions to scientific education. Our vital interest to deepen this collaboration in the future will be relieved by the new highway connecting Adlershof and the TU Berlin campus, which makes us almost neighbours.

Last, but not least we would like to thank our partners in the research institutes and in industry for the fruitful cooperation. These partners do not only use our results, but also deliver us new targets for our application-oriented research.

Berlin, February 2007



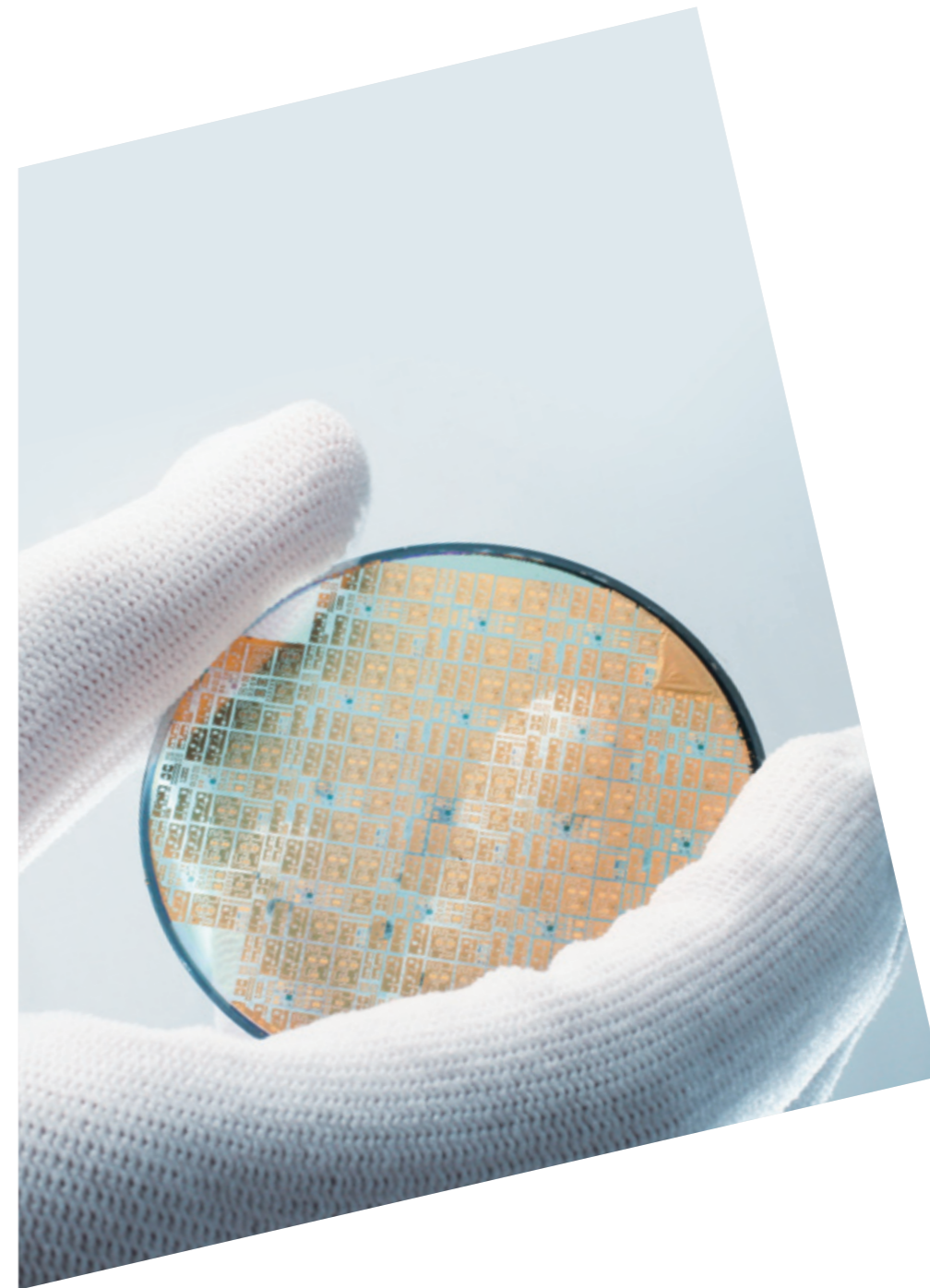
Günther Tränkle

INHALTSVERZEICHNIS CONTENTS

PROFIL PROFILE	7
SCHLAGLICHTER HIGHLIGHTS	17
GESCHÄFTSFELDER & FORSCHUNG BUSINESS SEGMENTS & RESEARCH AREAS	33
HOCHLEISTUNGSDIODENLASER HIGH-POWER DIODE LASERS	
	34 Einführung Introduction
	35 Hochleistungsdiodenlaser mit hohem Wirkungsgrad High-Power High-Efficiency Diode Lasers
	38 Breitstreifenlaser und Barren im roten Spektralbereich Red Emitting Broad Area Lasers and Bars
	41 QCW-Diodenlaserstacks QCW Diode Laser Stacks
	44 Hochleistungs-DFB-Laser High-Power DFB Lasers
	47 Trapezlaser Tapered Lasers
MIKROWELLENKOMPONENTEN & -SYSTEME MICROWAVE COMPONENTS & SYSTEMS	
	54 Einführung Introduction
	55 GaN-Hochleistungstransistoren und ICs GaN High-Power Transistors and ICs
	60 Flip-chip-montierte Hochvolt-Leistungs-HBTs Flip-Chip-Mounted High-Voltage Power HBTs
	63 Robuste rauscharme MMICs Robust GaN Low-Noise Amplifier MMICs
	65 Miniaturisierte 24 GHz-Low-power-Frontends Low-Power Minaturized 24 GHz Front-Ends
	68 Mikrowellen-Plasma-Erzeugung Microwave Plasma Generation
EXPLORATIVE TECHNOLOGIEN EXPLORATIVE RESEARCH	
	72 Einführung Introduction
	73 GaN-Optoelektronik GaN Optoelectronics
	76 Laser-Mikrostrukturierung von Vias Laser-Assisted Micro Processing of Vias
	79 GaN-HVPE GaN HVPE

PROFIL

■ **PROFILE**



Das FBH im Profil

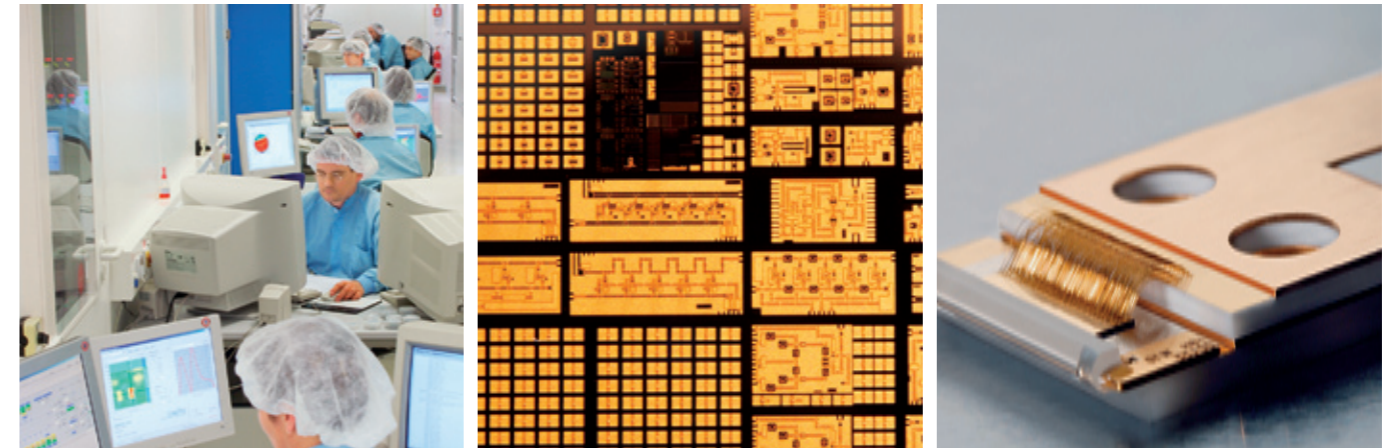
Das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik erforscht Schlüsseltechnologien in der Mikrowellentechnik und Optoelektronik. Es realisiert Höchstfrequenz-Bauelemente und Schaltungen für die Kommunikationstechnik und Sensorik. Diodenlaser hoher Leistung und Brillanz entwickelt das Institut unter anderem für die Materialbearbeitung, Medizintechnik und Präzisionsmesstechnik. Für künftige Anwendungen, beispielsweise in den Lebenswissenschaften und der Weltraumtechnik, erforscht das FBH Lichtquellen im blauen und ultravioletten Spektralbereich sowie Transistoren für sehr hohe Spannungen. Diese Entwicklungen beruhen auf grundlegenden Untersuchungen zu neuen III/V-Halbleitermaterialien wie Nitriden.

Das FBH ist ein international anerkanntes Kompetenzzentrum für III/V-Verbindungshalbleiter. Es betreibt industriekompatible und flexible Reinraumlabor 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.

FBH at a glance

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, medical technology and high precision metrology. For future applications, in e.g. life sciences and space technology, the FBH explores light sources in the blue and ultraviolet spectral range as well as transistors for very high voltages. These developments rely on basic investigations on new III-V semiconductor materials systems like nitrides.

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

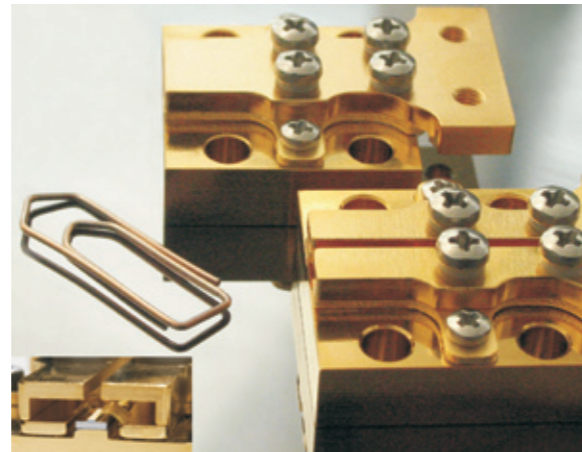
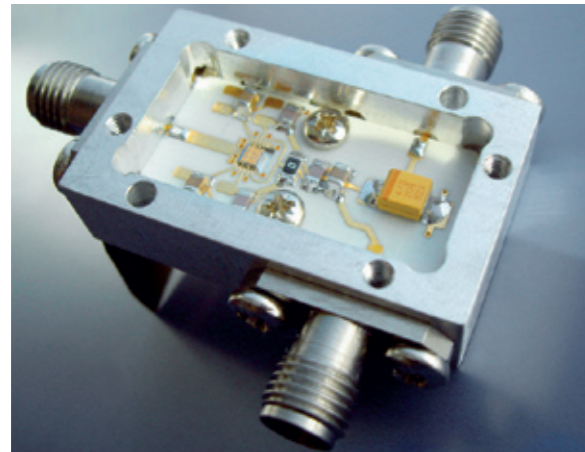
... translating ideas into innovation

- 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 Ergebnisse in enger Zusammenarbeit mit Forschung und Industrie in praktische Anwendungen um und transferieren innovative Produktideen erfolgreich durch Spin-offs.
- Wir offerieren hochwertige Produkte und Services, die exakt auf die Anforderungen unserer Kunden zugeschnitten sind.
- Wir bieten unseren Mitarbeitern ein stabiles und attraktives Arbeitsumfeld mit reizvollen Aufgabenstellungen und Entfaltungsmöglichkeiten. Unsere Zukunft sichern wir durch die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und technischer Fachkräfte. Wir haben es uns zur Aufgabe gemacht, den Anteil weiblicher Fach- und Führungskräfte im technischen und naturwissenschaftlichen Bereich gezielt zu erhöhen.

Mission Statement

... translating ideas into innovation

- We explore cutting-edge technologies for innovative applications in the fields of microwaves and optoelectronics. As a center of competence for III-V compound semiconductors, we are part of a worldwide network and achieve research results advancing the international state-of-the-art.
- We offer complete solutions as a one-stop agency - from design to ready-to-ship modules.
- In close cooperation with our partners in research and industry, we use our results to develop cutting-edge products. By means of spin-off companies, we transfer innovative product ideas to 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.



■ **Forschungsschwerpunkte**

Mikrowellentechnik & III/V-Elektronik

- Galliumarsenid-Elektronik mit Heterobipolartransistoren: MMICs bis 80 GHz und Leistungsverstärker bis 10 GHz
- Galliumnitrid-Elektronik: Mikrowellenleistungstransistoren bis 10 GHz (Leistung: >> 10 Watt)
- Galliumnitrid-Transistoren für hohe Spannungen und kW-Leistungen

Optoelektronik

- Hochleistungsdiodenlaser im Spektralbereich 0,6 - 1,2 μm
- Brillante Diodenlaser mit Linienbreiten < 10 MHz
- Halbleiter-Scheibenlaser
- Hybride Diodenlasersysteme
- Laseranwendungen für die Sensorik
- Galliumnitridbasierte Laser und LEDs

■ **Research topics**

Microwaves & III-V Electronics

- Gallium arsenide electronics with heterojunction bipolar transistors: MMICs up to 80 GHz and power amplifiers up to 10 GHz
- Gallium nitride electronics: microwave power transistors up to 10 GHz (power: >> 10 Watt)
- Gallium nitride transistors for high voltages and output power in the kW range

Optoelectronics

- High-power, high-brightness diode lasers at 0.6 - 1.2 μm
- High brilliance diode lasers: linewidth < 10 MHz
- Semiconductor disc lasers
- Hybrid laser systems
- Laser applications for sensor technology
- Gallium nitride based lasers and LEDs

■ **Lösungen & Services aus einer Hand**

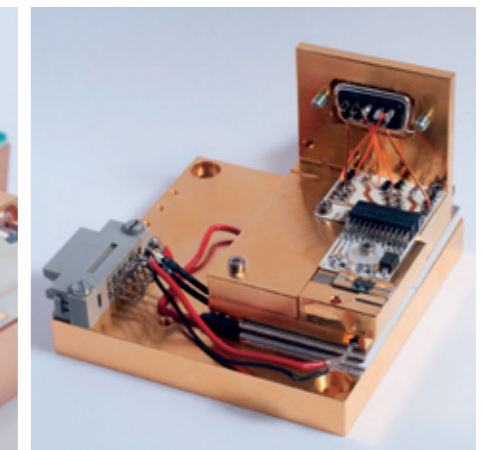
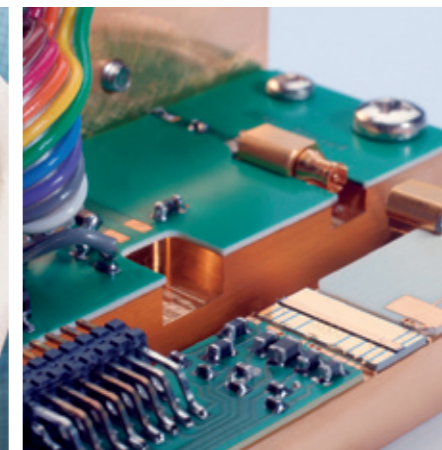
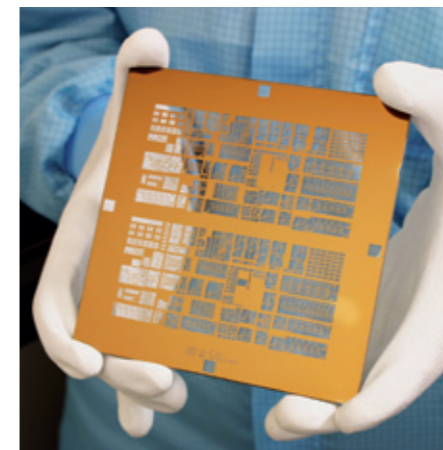
Für Partner aus Forschung und Industrie entwickelt das FBH hochwertige Produkte und Services, die auf individuelle Anforderungen zugeschnitten sind. Seinem internationalen Kundenstamm bietet es Know-how und Komplettlösungen aus einer Hand: vom Entwurf bis zum lieferfähigen Modul.

- Entwicklung und Durchführung kundenspezifischer III/V-Halbleiterprozesse
- Realisierung von Mikrowellen-Komponenten (HBTs, MMICs) – bis hin zur Kleinserienfertigung
- Elektromagnetische Simulation und Design für die Mikrowellen-Aufbautechnik
- Entwicklung „maßgeschneiderter“ Diodenlaser – bis hin zur Kleinserienfertigung
- Modulentwicklung für hybrid-integrierte Lasersysteme
- Wissenschaftliche und technologische Services: Messtechnik und Technologie für Universitäten und Unternehmen

■ **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

- Development and realization of customer-specific III-V semiconductor processes
- Realization of microwave components (HBTs, MMIC) – up to small-scale production
- Electromagnetic simulation and design for microwave packaging
- Development of „tailor-made“ diode lasers – up to small-scale production
- Development of modules for hybrid integrated laser systems
- Scientific and technological services: measurement and technology for universities and companies



■ **Kontakt & Ansprechpartner / Contact**

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

Tel. / 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	Tel. / Phone: 030.6392-2601 guenther.traenkle@fbh-berlin.de
Stellvertretender Direktor Associate Director	Dr.-Ing. habil. Wolfgang Heinrich	Tel. / Phone: 030.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
Optoelektronik Optoelectronics	Dr. rer. nat. Götz Erbert	Tel. / Phone: 030. 6392-2656 goetz.erbart@fbh-berlin.de
Mikrowellentechnik Microwaves	Dr.-Ing. habil. Wolfgang Heinrich	Tel. / Phone: 030.6392-2620 wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de
Prozesstechnologie Process Technology	Dr.-Ing. Joachim Würfl	Tel. / Phone: 030.6392-2690 joachim.wuerfl@fbh-berlin.de
Materialtechnologie Materials Technology	Dr. rer. nat. Markus Weyers	Tel. / Phone: 030.6392-2670 markus.weyers@fbh-berlin.de
Kommunikation & Marketing Communications & Marketing	Petra Immerz, M.A.	Tel. / Phone: 030.6392-2626 petra.immerz@fbh-berlin.de



■ **Der Forschungsverbund Berlin e.V.**

Der Forschungsverbund Berlin e.V. (FVB) ist Träger von acht natur-, lebens- und umweltwissenschaftlichen Forschungsinstituten in Berlin, die unter Wahrung ihrer wissenschaftlichen Eigenständigkeit im Rahmen einer einheitlichen Rechtspersönlichkeit gemeinsame Interessen wahrnehmen. Als Forschungseinrichtungen von überregionaler Bedeutung und gesamtstaatlichem wissenschaftspolitischen Interesse werden die Institute im Rahmen der gemeinsamen Forschungsförderung von Bund und Ländern finanziert. Die Institute 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
Email fabich@fv-berlin.de
Web www.fv-berlin.de

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

The Forschungsverbund Berlin e.V. (FVB) comprises eight research institutes in Berlin. The institutes are active in the fields of natural sciences, life sciences and environmental sciences. They pursue common interests within the framework of a single legal entity while preserving their scientific autonomy. As research institutes of national scientific importance, they are jointly funded by the German federal and state governments. The institutes share an administrative infrastructure (Common Administration, Head: Dr. Falk Fabich) and belong to the Leibniz Association.

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

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

2005

Mitarbeiter

- 160 (150 Mitarbeiter + 10 studentische Hilfskräfte)

Umsatz

- Grundfinanzierung durch das Land Berlin und den Bund (9,4 Mio. Euro)
- öffentliche Drittmittel (2,9 Mio. Euro)
- industrielle Auftragsforschung (2,8 Mio. Euro)

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)

The Institute in Figures

Founded 1992

2005

Staff

- 160 (150 employees + 10 student assistants)

Budget

- Basic funding: State of Berlin & Federal Government (9.4 Mio. Euro)
- Public project funding (2.9 Mio. Euro)
- Industrial contracts (2.8 Mio. Euro)

2006

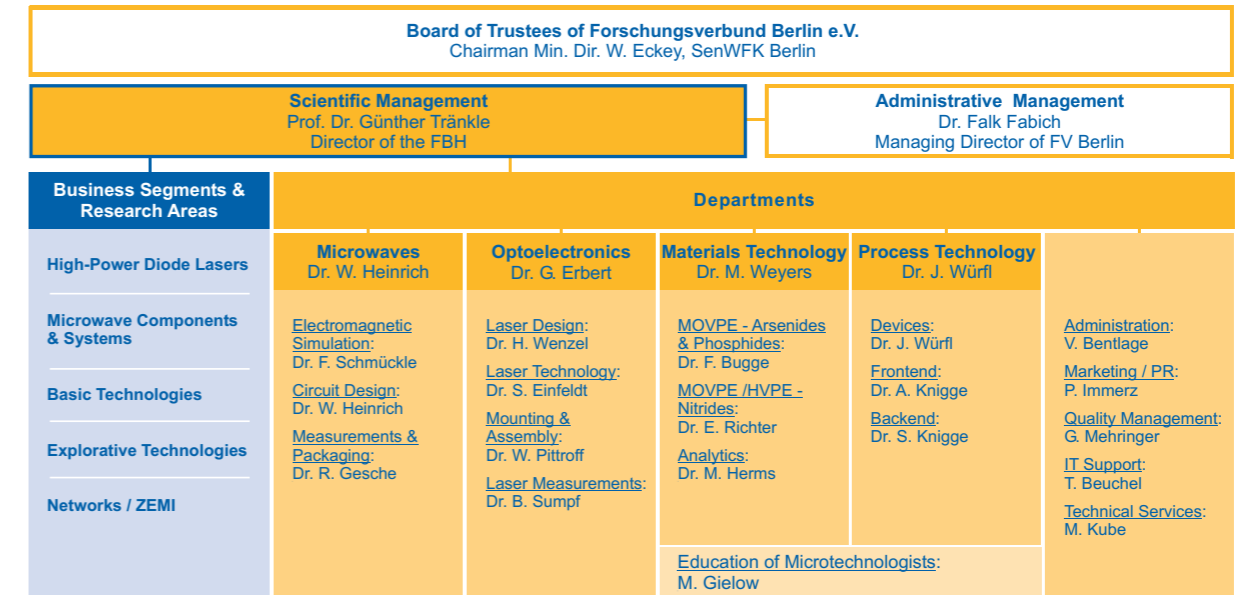
Staff

- 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)

Organigramm / Organizational Chart



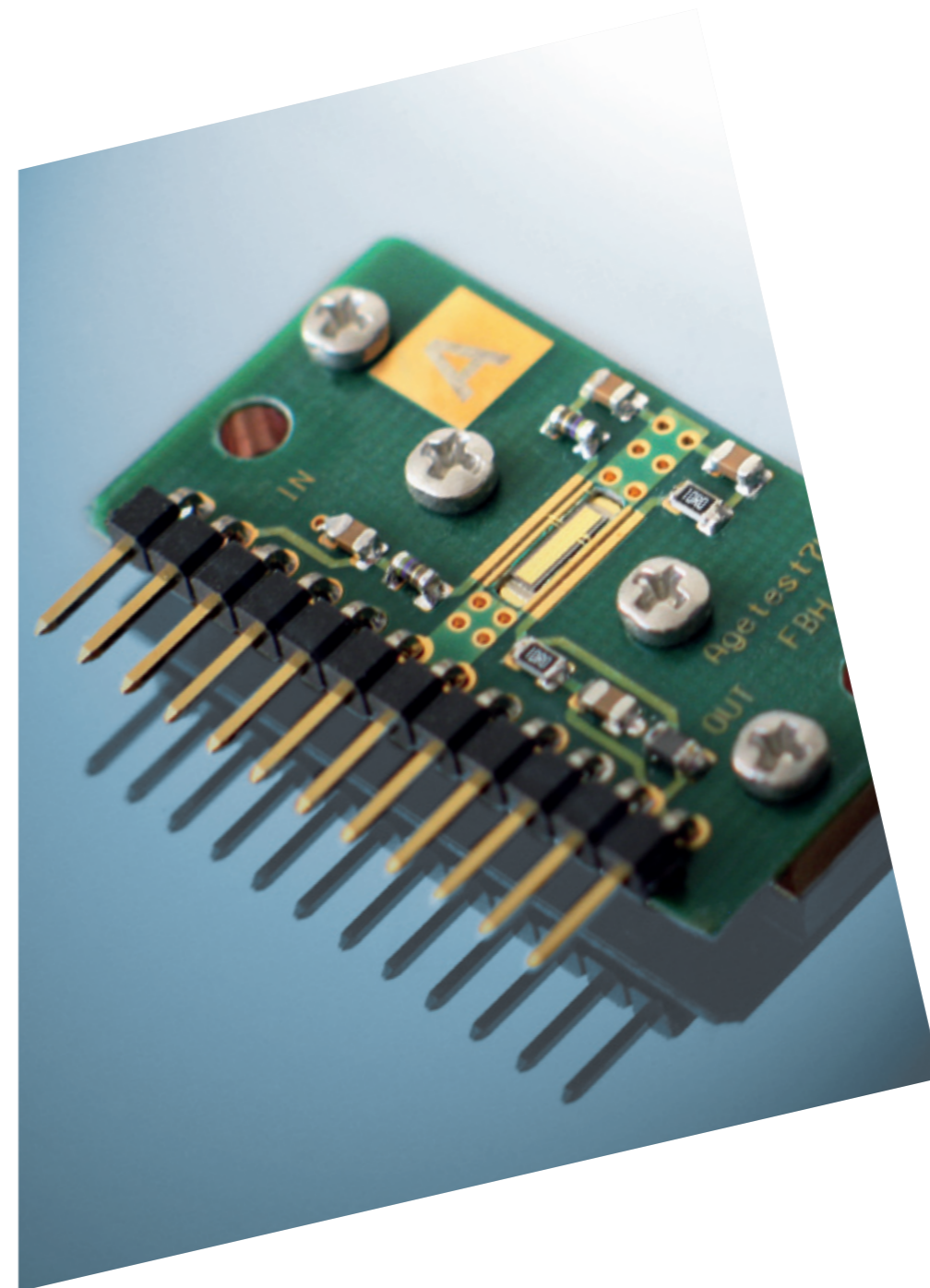
Wissenschaftlicher Beirat / Scientific Board

Prof. Dr. Christian Boit	Technische Universität Berlin, Berlin
Dr. Hans J. G. Brugger	EADS Deutschland GmbH, Ulm
Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling	Universität Ulm, Ulm
Prof. Dr. Marc Illegems	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne (Schweiz)
Dr. Roland Müller	OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg
Dr. Gerhard Packeiser	Infineon Technologies AG, München
Prof. Dr. Herbert Reichl	Fraunhofer IZM, Berlin
Prof. Dr. Hartmut Roskos	Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main
Dr. Theodor Wiesmann	Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG, Backnang
Prof. Dr. Bernd Wilhelmi	Jenoptik AG, Jena



Beiratssitzung, November 2006
Meeting of the Scientific Board, November 2006

SCHLAGLICHTER
HIGHLIGHTS



■ **Neue Wege gehen: Grundlagenforschung mit Anwendungsbezug**

Ungewöhnliche Wege gehen, um rasch optimale Ergebnisse zu erzielen – das gilt nicht nur für die Forschung selbst, sondern auch für neue Kooperationsmodelle, wie die Zusammenarbeit des FBH mit dem TU-Professor Michael Kneissl zeigt. Seit Mitte 2005 arbeitet der Wissenschaftler nicht nur an der Berliner Universität, sondern auch am Ferdinand-Braun-Institut an LEDs und Lasern auf Galliumnitridbasis für den blauen und ultravioletten Spektralbereich. Diese gelten aufgrund ihrer Materialeigenschaften und dem geringen Energieverbrauch als höchst attraktiv für eine Vielzahl von Anwendungen, von der allgemeinen Beleuchtung bis hin zur Displaytechnologie.

Als Professor an der Technischen Universität Berlin erforscht er die Grundlagen dieser Lichtquellen. Zugleich leitet er eine Arbeitsgruppe am FBH, um Anwendungen wie beispielsweise UV-Lichtquellen zur Wasserdesinfektion oder blaue Laser zum Beschreiben von DVDs und anderen Datenträgern zu entwickeln. Von den Ergebnissen profitieren alle Partner. Das zeigt, dass es sowohl um hoch attraktive Applikationen geht, als auch, dass die Verbindung aus Grundlagenforschung und Anwendungsorientierung ein Gewinn für alle Beteiligten ist.

■ **Erfolg für Nachwuchsforscherguppe: Hybride Diodenlasersysteme**

Drei Millionen Euro werden in das 2006 gestartete Projekt „hybride Diodenlasersysteme“ fließen. Das 6-köpfige Team rund um Projektleiterin Dr. Katrin Paschke wird über fünf Jahre an der Entwicklung miniaturisierter Laserstrahlquellen arbeiten. Die kompakten Diodenlaser-Systeme sollen zuverlässig Licht im sichtbaren Spektralbereich (rot, grün und blau) mit drei bis fünf Watt Ausgangsleistung liefern und unter anderem in der Displaytechnologie, Sensorik und der Medizintechnik eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch präzise Wellenlängen, direkte Modulierbarkeit, Leistungsstabilität, kleine Abmessungen, geringen Energieverbrauch, hohe Lebensdauer und Wartungsfreiheit bei relativ niedrigen Herstellungskosten aus. Damit können sie künftig komplexe, teure und große Lasersysteme wie Gas- oder Festkörperlaser ersetzen. Mögliche Anwendungsfelder sind das Laserfernsehen, das Bilder in Kinoqualität für Zuhause liefern soll, sowie optische Spektroskopieverfahren zur Analyse von Spurengasen und zum Nachweis von Umweltver-

■ **Striking New Paths: Basic Research with Application Orientation**

Breaking new ground in order to achieve optimum results within best time – this applies not only to research itself, but also to new cooperation models, as the one between FBH and TU professor Michael Kneissl. Since the middle of 2005, the scientist not only works at the Technische Universität Berlin but also at the Ferdinand-Braun-Institut on gallium nitride based LEDs and lasers for the blue and ultraviolet spectral range. Because of their material properties and low energy consumption, these lasers are considered to be highly attractive for a great variety of applications, from general illumination to display technology.

As a professor, Michael Kneissl conducts basic research on these light sources. At the same time he is in charge of a work group at the FBH, aiming to develop applications such as UV light sources for water disinfection and blue lasers for the writing of DVDs and other data mediums. The cooperation is a win-win situation for both partners, anticipating highly attractive applications while conducting basic investigations. The combined efforts between basic and application oriented research demonstrate the benefit for all partners involved.

■ **Success for Junior Research Group: Hybrid Diode Laser Systems**

Three million Euro will be invested within the next five years in “hybrid diode laser systems”, a new project started in 2006. Project leader Dr. Katrin Paschke and her six-headed team will develop the miniaturized and compact laser systems, which are supposed to deliver light in the visible spectral range (red, green and blue) with an output power of three to five watt. They will be used for applications in display technology, sensor technology, and medical technology. The brilliant light sources are not only maintenance free at comparatively low manufacturing costs, but also distinguished by precise wavelengths, direct modulation, output stability, small dimensions, low energy consumption, and high reliability. These properties make the compact laser systems an attractive option to replace complex, expensive and bulky systems such as gas and solid state lasers. Possible applications are laser television, delivering high resolution images in cinema quality for home use, as well as optical spectroscopy for analytics of trace gases and the evidence of environmental pollution. In me-

schmutzungen. In der Medizintechnik eignen sich die brillanten Lichtquellen unter anderem zur DNA-Analytik, Zytologie oder zellulären Mikroskopie. Durch die Kompaktheit und Mobilität der Diodenlaser können zusätzliche Anwendungsfelder erschlossen werden.

■ **Unverzichtbare Komponenten: FBH-Entwicklungen für die Grundlagenforschung**

Ein Transfer von Forschungsergebnissen aus dem FBH ergibt sich immer häufiger in Anwendungen der Grundlagenforschung. Ein Beispiel ist die Kooperation mit dem Max-Born-Institut (MBI) bei der Realisierung eines Table-top Röntgenlasers. Dafür realisiert das FBH 300 neuartige gepulste Diodenlaserstacks – jeder einzelne muss zuverlässig funktionieren, um den Röntgenlaser mit der benötigten Lichtenergie zu versorgen, ihn also zu pumpen. Das Konzept ist völlig neu, daher spricht das MBI in diesem Zusammenhang auch von einem „Meilenstein in der Entwicklung von Röntgenlasern“. Die großen Vorteile sind neben dem kurzwelligem Licht seine vergleichsweise kleine Größe und erforderliche geringe Pumpenergie. Die Fläche mehrerer Schreibtische soll nun ausreichen, um einen Röntgenlaser aufzubauen. Damit kann die intensive kurzwellige Lichtquelle auch in anderen Labors aufgebaut werden und wird für industrielle Anwendungen interessant. Ihre Flexibilität und Verbreitungsmöglichkeit macht sie zu einer interessanten Alternative zu den kurzwelligen Freien Elektronen Lasern (FEL), die als einzelne Großanlagen auf der Basis von Teilchenbeschleunigern arbeiten.

dical technology, the brilliant light sources are suitable for DNA analytics, cytopathology and cellular microscopy. Because of their compactness and mobility, new fields of application can be opened up for these diode lasers.

■ **Indispensable Components: FBH's Developments for Basic Research**

Increasingly more, research results from the FBH are transferred into applications of basic research, as for example the cooperation with the Max-Born-Institut (MBI) indicates. The FBH develops novel pulsed diode laser stacks for an MBI research project to be built in a table-top X-ray laser. The stacks are so important, that the whole system would not run without them. 300 pieces are required and each of them needs to operate reliably in order to deliver the necessary pump energy for the X-ray laser. The concept is completely new, therefore the MBI even names it a “milestone in the development of X-ray lasers”. The big advantages of such a unit are not only the short-waved light and its comparably small size, but also the low pump laser energy which is required. In addition, a diode laser based X-ray laser will need only the area of several desks. These properties make it an attractive option for industrial applications, as the intensive short-waved light source can also be assembled in other laboratories. Their flexibility and mobility makes it also an interesting alternative to short-waved free electron lasers (FEL), working as single research centers on the basis of particle accelerators.



M. Kneissl (r.) am MOVPE-Reaktor
M. Kneissl at the MOVPE reactor



Gruppenleiterin Katrin Paschke
Group leader Katrin Paschke

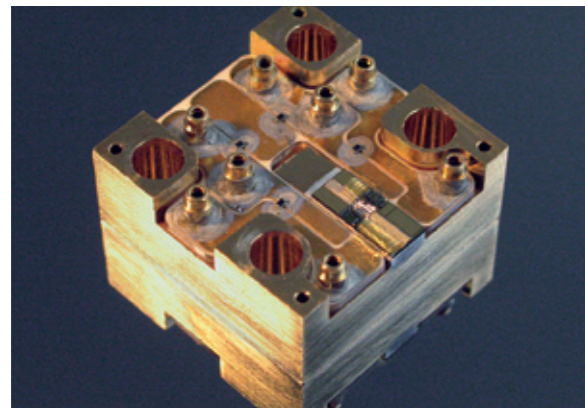


Diodenlaserstacks
Diode laser stacks

■ **Keine Chance für Gammelfleisch: Projekt FreshScan gestartet**

Im Juli 2006 ist das Forschungsprojekt „FreshScan“ gestartet. Eine Expertengruppe aus fünf Forschungseinrichtungen wird in den folgenden drei Jahren einen Prototypen zur Prüfung des Frischegrades von Lebensmitteln und der lückenlosen Nachverfolgung von Logistik- und Kühlketten entwickeln. Durch den Einsatz von Mikrosystemtechnik sollen die Produktionskette vom Erzeuger bis zum Endverbraucher erfasst und die Produktzustände lückenlos dokumentiert werden.

Projektbestandteil ist ein mobiler „Frischescanner“, der mittels optischer Sensorik Daten ermitteln soll, um den Produktzustand zu prüfen. Dafür wird ein Laser benötigt, der am FBH derzeit entwickelt wird. Der Scanner arbeitet mit Laserlicht, das je nach Zustand des Fleisches unterschiedlich gestreut und reflektiert wird. Unter anderem mithilfe der Raman-Spektroskopie wird das vom Fleisch zurückgestreute Licht analysiert. Ob das Lebensmittel den vorgegebenen Anforderungen entspricht, kann so schnell und unkompliziert geprüft werden. Die Historie des Lebensmittels ist in allen Bereichen transparent und rückverfolgbar.



Hybrides Mikrosystem
Hybrid microsystem

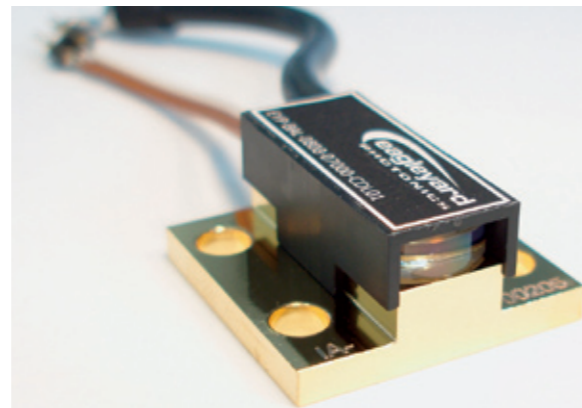
■ **Beispielhafter Transfer: eagleyard Photonics setzt Wachstumskurs fort**

Das FBH-Spin-off erfreut sich seit seiner Gründung im Jahre 2002 eines stetigen Aufschwungs. Es wurde einst aus dem Ferdinand-Braun-Institut ausgegründet, um die steigende Nachfrage nach Diodenlasern aus dem Institut zu befriedigen. Mittlerweile fertigt eagleyard die am Institut entwickelten Diodenlaser in unterschiedlichen Gehäuseformen, Ausgangsleistungen und Wellenlängen und vermarktet sie weltweit.

■ **No Chance for Spoiled Meat: Project FreshScan is Started**

In July 2006, the research project „FreshScan“ started. Within the following three years, a group of experts comprising five research institutes is aiming to develop a prototype to detect the freshness of food and to trace the logistics and cold chain without gap. By use of microsystems technology the production chain from the producer to the consumer shall be registered and the condition of the product consistently documented.

Part of the project is a mobile “freshness scanner”, registering data via optical sensor technology in order to check the condition of the product. Therefore a laser is required, which is currently developed at the FBH. The scanner works with laser light, which refracts and reflects light depending on the actual condition of the meat. Amongst others, by means of Raman Spectroscopy the light refracted back from the meat will be analyzed. Whether the food meets the given requirements, can be verified quickly and easily. The history of food at each section of the handling process will be transparent and traceable.



10 Watt CDL-Laserdiode
10 Watt CDL laser diode

■ **Exemplary Transfer: eagleyard Photonics Continues Expanding**

Since founding, eagleyard Photonics is rejoicing a constant upturn. Once spun off the Ferdinand-Braun-Institut, the company was founded to meet the growing demand for the institute’s diode lasers. Meanwhile eagleyard manufactures diode lasers developed at the FBH in various packages, with different output powers and wavelengths and markets them worldwide.

Die Zahlen dokumentieren das erfreuliche Wachstum. So konnten die Umsätze insbesondere durch ein überproportionales Wachstum (150%) in Nordamerika deutlich gesteigert werden. Der Gesamtumsatz lag um über 70% höher als der Vorjahresumsatz. Das Produktportfolio wurde stetig erweitert, Laser mit höheren Leistungsbereichen und verbesserte Bauformen wurden eingeführt. Die Laborflächen wurden zur Erhöhung der Fertigungskapazitäten seit der Gründung mehr als verdoppelt und die Mitarbeiterzahl ist mittlerweile auf 20 angewachsen.

Nach wie vor arbeiten eagleyard und das FBH eng zusammen. Das Spin-off profitiert vom langjährigen Erfahrungspotential sowie dem Know-how bei der Entwicklung von Höchstleistungslasern des FBH. Das Institut wiederum bekommt zunehmend mehr Forschungsaufträge von den Kunden seiner Ausgründung.

■ **Erfolgreicher Ausbau: Spin-off JENOPTIK Diode Lab eröffnet Berliner Produktionsstätte**

Im Mai 2006 wurde das neue Fertigungsgebäude der JENOPTIK Diode Lab feierlich mit Festakt und Laser-show eingeweiht. Unter den etwa 100 geladenen Gästen waren Prominente aus Politik und Wirtschaft, darunter der Regierende Bürgermeister Klaus Wowereit und Jenoptik-Vorstand Alexander von Witzleben. Im August 2005 hatte Jenoptik den Grundstein für das moderne Fertigungsgebäude mit 2.000 qm Gesamtfläche und 750 qm Produktionsfläche in Berlin-Adlershof

Figures document the joyful growth: Turnover significantly increased especially by a disproportionately high growth (150%) in Northern America. Total turnover was more than 70% higher compared to the previous year. Eagleyard continuously expanded the product portfolio and launched lasers with a higher range of performance and improved packages. To enlarge production capacities, the laboratory area was more than doubled since formation and the number of employees increased to 20.

Still, eagleyard and the FBH work together closely. The spin-off benefits from the institute’s long-time experience and know-how in the development of high-power diode lasers. In turn, the institute receives research assignments to an increasingly greater extent from the customers of its spin-off.

■ **Successful Extension: Spin-off JENOPTIK Diode Lab Opens up Berlin Production Facility**

In May 2006, JENOPTIK Diode Lab inaugurated their new fabrication building with a ceremonial act and a laser show. About 100 guests were invited, among them celebrities from politics and economics, as for example Klaus Wowereit, the Governing Mayor of Berlin, and Jenoptik’s CEO Alexander von Witzleben. Jenoptik had laid the cornerstone in Berlin Adlershof for the modern production facility with 2,000 sqm total area and 750 sqm production area in August 2005. The company



gelegt. Über den eigenen Bedarf der Jenoptik hinaus, sollen weitere Kunden mit Halbleiterchips beliefert und Hochleistungs-Laserbarren weltweit vermarktet werden. Mit dem Produktionsstart Ende 2006 soll die Mitarbeiterzahl am Berliner Standort von heute 18 auf rund 40 steigen.

Die neue Produktionsstätte liegt in unmittelbarer Nachbarschaft des FBH und ist Ergebnis der langjährigen und produktiven Zusammenarbeit zwischen Jenoptik und dem Ferdinand-Braun-Institut. Die Diode Lab ist im Februar 2002 als Spin-off aus der engen Kooperation zwischen Jenoptik und dem FBH hervorgegangen. Sie ist ein Beispiel für nachhaltigen Know-how- und Technologietransfer: Das Unternehmen fertigt optoelektronische Halbleiterbauelemente für Diodenlaser und nutzt dabei Forschungsergebnisse des Ferdinand-Braun-Instituts. Gemeinsam decken FBH und Jenoptik bei Diodenlasern sämtliche Entwicklungs- und Fertigungsschritte ab: von der Erforschung des Halbleitermaterials, über die Produktion bis hin zum Einbau in Systeme.

Der jüngste Spross: BeMiTec

Schneller und leistungsfähiger: Das sind die Attribute der neuartigen Galliumnitrid-Leistungstransistoren (GaN) mit denen sich die BeMiTec AG auf dem Mobilfunkmarkt von morgen behaupten will. Produktion und Vermarktung von zukunftsorientierten Hochleistungsverstärkern, so die Geschäftsidee der jüngsten von insgesamt fünf Ausgründungen aus dem Ferdinand-Braun-Institut. Sieben Wissenschaftler und Führungskräfte des FBH haben BeMiTec im Januar 2006 gegründet und bauen so auf der Forschungskompetenz des Instituts auf.

Die Einsatzbereiche liegen in der drahtlosen Kommunikation (Mobilfunk, WLAN, WiMAX), die immer höhere

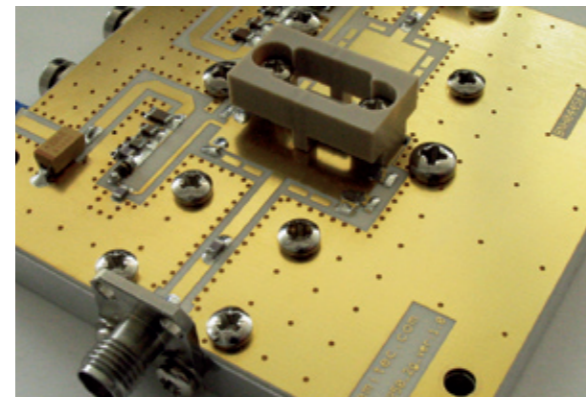
aims to supply more customers worldwide with semiconductor chips and wants to market high-power laser bars internationally, beyond the demands of the Jenoptik group. When production starts, the number of employees is planned to go up from today 18 to about 40.

The new production facility is in close neighborhood to the FBH and is a result of the long-term and productive collaboration between Jenoptik and the Ferdinand-Braun-Institut. Diode Lab was founded in February 2002 as a result of the close cooperative work between Jenoptik and FBH. The company is an example for sustainable transfer of know-how and technology: Diode Lab produces optoelectronic semiconductor devices for diode lasers and uses research results of the Ferdinand-Braun-Institut. Together, FBH and Jenoptik cover in the field of diode lasers all steps in development and processing: ranging from the research of the semiconductor material, the production to the mounting in systems.

The Youngest Scion: BeMiTec

Faster and more powerful: These are the attributes of the novel gallium nitride power transistors (GaN) with which BeMiTec AG wants to compete in the mobile market of tomorrow. The business idea is to produce and market the future-oriented high-power amplifiers. The youngest of the five spin-offs from the Ferdinand-Braun-Institut was founded by seven scientists and executives in January 2006 and is thus building up on the research competence of the institute.

The fields of application are in wireless communications (mobile communications, WLAN, WiMAX) as



Galliumnitrid-Transistor in Testfassung
Gallium nitride transistor in evaluation board

technische Anforderungen an die Sendeverstärker in den Basisstationen stellt. Ein weiterer Einsatzbereich sind konfigurierbare Mobilfunk-Basisstationen. Durch ihre Breitbandigkeit lassen sich solche Basisstationen einfach für die verschiedenen Mobilfrequenzen umschalten. Da nur noch ein Grundtyp gefertigt werden muss, reduzieren sich die Herstellungs- und Betriebskosten.

Eingebunden: das FBH und seine Netzwerke

Das FBH ist in zahlreiche Netzwerke eingebunden, wie Optische Technologien aus Berlin und Brandenburg (OptecBB), Kompetenzzentrum Nanostrukturen für die Optoelektronik (NanOp) und Initiativegemeinschaft Außeruniversitärer Forschungseinrichtungen in Adlershof e. V. (IGAFA).

emitter amplifiers in base stations make great technical demands. A further possible application are configurable mobile base stations. Because of their broadband properties, these base stations can easily shift between the diverse mobile frequencies. As only one basic type has to be produced, manufacturing and operational costs can be reduced.

Integrated: The FBH and its Networks

The FBH is integrated in a couple of networks, like Optische Technologien aus Berlin und Brandenburg (OptecBB), Kompetenzzentrum Nanostrukturen für die Optoelektronik (NanOp) and Initiativegemeinschaft Außeruniversitärer Forschungseinrichtungen in Adlershof e. V. (IGAFA).



Summer School am FBH
Summer school at the FBH



Summer School-Teilnehmer
Participants summer school



Infostand Mikrotechnologen-Ausbildung
Microtechnologists information booth

Besonders aktiv engagiert sich das Ferdinand-Braun-Institut beim Zentrum für Mikrosystemtechnik (ZEMI, www.zemi-berlin.de) in Berlin-Adlershof. Günther Tränkle ist dort nicht nur Sprecher, ZEMI ist mit seiner Geschäftsstelle auch organisatorisch am Institut angesiedelt. Der Verbund Berliner Forschungseinrichtungen bündelt das regionale Forschungs- und Entwicklungspotenzial in der Mikrosystemtechnik. Als zentraler Ansprechpartner steht das Netzwerk für Industriekooperationen zur Verfügung und unterstützt insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen durch Technologietransfer.

Particularly involved is the Ferdinand-Braun-Institut in the Center for Microsystems Technology Berlin (ZEMI, www.zemi-berlin.de) in Adlershof. Günther Tränkle is speaker of the board of directors and the ZEMI office is located and organizationally integrated in the institute. ZEMI is an association of research institutes which focuses on the regional research and development potential in microsystems technology. As a one-stop agency, ZEMI is the central contact for industry co-operation and particularly supports small and medium-sized companies via technology transfer.

Ein Beispiel für die fruchtbare Zusammenarbeit ist das 2005 unter dem Dach von ZEMI gestartete Netzwerk EMiL-NET (www.emil-net.de). EMiL steht für „Entwicklung von Mikrosystemtechnik für innovative Lebensmittelherzeugung“ und erschließt neue Themenfelder in der Agrartechnik und Lebensmitteltechnologie mithilfe der Mikrosystemtechnik. „FreshScan“ (siehe oben) ist das erste gemeinsame Projekt, das von EMiL-NET initiiert wurde.

ZEMI engagiert sich außerdem seit vielen Jahren in der Aus- und Weiterbildung und koordiniert das Netzwerk MANO (Mikrosystemtechnik-Ausbildung in Nord-Ostdeutschland, www.m-a-n-o.net). Hier werden neue Bildungskonzepte für die Mikrosystemtechnik entwickelt und umgesetzt. Aufgrund der erfolgreichen Arbeit in MANO ist ZEMI seit Anfang 2005 auch Sprecher des gesamtdeutschen Vorhabens Aus- und Weiterbildungsnetzwerke für die Mikrosystemtechnik (AWNET, www.mst-ausbildung.de) und koordiniert die Zusammenarbeit und den Erfahrungsaustausch der insgesamt sechs regionalen Netzwerke.

Im September 2006 hat ZEMI erstmalig die Microsystems Summer School in Berlin erfolgreich organisiert. 22 Studentinnen und Studenten haben sich fünf Tage lang über die neuesten Trends in der Mikrosystemtechnik informiert. Die positive Resonanz macht Lust auf mehr. So ist die nächste Microsystems Summer School 2007 mit internationaler Ausrichtung geplant.

■ Gut gebaut: Platz für ein wachsendes Institut

Nach umfangreichen Neubau- und Sanierungsaktivitäten am FBH sind die Zeiten von Baumaschinenlärm, Hämmern und Malern endlich vorbei. Nach insgesamt zweieinhalbjähriger Bauzeit wurden im Dezember 2006 die letzten Solarmodule an die Laborhalle montiert und die Bauarbeiten am FBH damit abgeschlossen. Allerdings ist mit der zunehmenden Anzahl von Projekten auch die Mitarbeiterzahl allein im vergangenen Jahr von etwa 150 auf 175 deutlich gestiegen, sodass der Platz im Institut bereits wieder knapp wird.

Im Juni 2004, ein Jahr nach der Grundsteinlegung, hatte das FBH seinen modernen Erweiterungsbau bezogen.

One example for the fruitful cooperation is the network EMiL-NET (www.emil-net.de), which was started in 2005 and is managed by ZEMI. EMiL (Entwicklung von Mikrosystemtechnik für innovative Lebensmittelherzeugung) stands for the development of microsystems technology for innovative production of food. The network opens up new topics in agricultural and food technology by means of microsystems technology. “FreshScan” (see above) is the first joint project initiated by EMiL-NET.

Since a couple of years, ZEMI is also engaged in education and advanced vocational training. It coordinates the network MANO (Mikrosystemtechnik-Ausbildung in Nord-Ostdeutschland – Microsystems Technology Education in North-East-Germany, www.m-a-n-o.net), which develops and implements new educational concepts for microsystems technology. Due to the successful work in MANO, ZEMI became in the beginning of 2005 manager of the projekt AWNET (Aus- und Weiterbildungsnetzwerke für die Mikrosystemtechnik – Education and Training for Microsystems Technology, www.mst-ausbildung.de). AWNET coordinates the cooperation and the exchange between the all in all six regional networks.

In September 2006, ZEMI successfully organized the first microsystems summer school in Berlin. Twenty-two students got caught up on the newest scientific trends in microsystems technology. As the feedback of the students was very affirmative, the next microsystems summer school in 2007 is projected for international participants.

■ Well-Built: Space for a Growing Institute

After comprehensive building and reconstruction activities, the times of heavy equipment, hammering and painting are finally over. After a construction period of two and a half years, in December 2006 the last solar modules were mounted to the clean room facility. With that solar wall, construction activity at the FBH is completed. Nevertheless, due to the growing extent of projects the number of employees increased since last year from 150 to 175. Therefore, space at the institute runs short again.

In June 2004, one year after laying the cornerstone, the FBH moved into its modern extension. The new building



Im neuen Gebäudeteil mit knapp 1.200 Quadratmeter Hauptnutzfläche befinden sich neben Büro- und Laborräumen ein teilbarer Seminarraum und die Bibliothek. Anschließend wurde der Altbau denkmalgerecht saniert und im Innenbereich vollständig entkernt. Nun stehen dort Büroräume zur Verfügung, die auf moderne Arbeitserfordernisse zugeschnitten sind und im Frühjahr 2005 wieder bezogen wurden. Auch die Arbeiten an den bestehenden Laborhallen und der Außenfassade sowie die Bepflanzung der Außenanlagen wurden Ende 2005 fertig gestellt. Mit der abgeschlossenen Verkleidung der Westseite der Laborhalle mit den innovativen Solarzellen der Firma Sulfurcell sind die Bauarbeiten inzwischen vollständig abgeschlossen.

Die Bauplanungen für den Alt- und Neubau stammen vom Dresdner Architekturbüro msp und wurden von den Architekten Christian Matzke und Klausjürgen Schöler betreut. Die Gesamtkosten der Baumaßnahme beliefen sich auf rund acht Millionen Euro, davon entfielen etwas mehr als die Hälfte auf den Neubau. Die Maßnahme wurde vom Bund und vom Land Berlin gemeinsam gefördert.

features just under 1,200 square meter main effective area and includes offices, laboratories, a separable conference room and the library. After the subsequent renovation of the landmarked historical building, since springtime 2005 the institute provides in this part of the building light flooded and modern equipped offices, too. The workings at the existing laboratory hall and the cladding as well as the planting of the outside facilities were carried out by end of 2005. Meanwhile, after the cladding of the western side of the laboratory hall with the innovative solar cells of Sulfurcell, building work is completed.

The plannings of the historical and the new building were carried out by the architecture firm msp, Dresden, and guided by the architects Christian Matzke and Klausjürgen Schöler. The overall costs of the building activity amount to eight million Euro, more than half of that amount was invested in the new building. The building activities were supported by the Federal Republic of Germany and the State of Berlin jointly.

■ **Forschung mit Qualitätsstandard
– FBH erfolgreich ISO-zertifiziert**

Im Dezember 2006 hat das FBH gleich zwei Qualitätsaudits durchgeführt. Das planmäßige Überwachungsaudit nach DIN/ISO 9001:2000 hat es erneut erfolgreich bestanden. Die insgesamt dritte Prüfung ergab wieder eine verlässliche, solide Kontinuität bei den Forschungsarbeiten und der Bearbeitung von Industrienaufträgen. Im Dezember 2004 war das Ferdinand-Braun-Institut erstmalig zertifiziert worden.

Kaum 14 Tage später hat das FBH auch die Zertifizierung gemäß der Umweltnorm 14001:2004 erfolgreich absolviert. Nun werden am Institut auch verstärkt typische Umweltziele verfolgt, wie beispielsweise die Einsparung von Ressourcen (Strom, Druckluft, etc.), Weiterentwicklung des bleifreien Lötens sowie eine konsequente Mülltrennung. Bereits erreichte Ziele aus 2005/2006, beispielsweise die Maßnahmen zur Stickstoff-Einsparung, wurden sehr positiv bewertet.

Mit der Zertifizierung nach ISO 14001:2004 hat das FBH übrigens, ähnlich wie mit der Einführung des Qualitätsmanagements vor drei Jahren, auf Anforderungen seiner zahlreichen Industriekunden reagiert. Da das FBH neben seiner grundlagenorientierten Forschung stark nachfrageorientiert arbeitet, gewinnen diese Standards mehr und mehr an Bedeutung. Die Zertifizierungen sind inzwischen oft Voraussetzung für die Vergabe von Forschungsaufträgen, denn Unternehmen bevorzugen auch im Forschungsbereich zunehmend Partner mit verlässlichen, transparenten Qualitätsstandards und einem klaren Bekenntnis zu umweltverträglichem Handeln.



■ **Research with Quality Standard
– FBH Successfully Certified**

In December 2006, the FBH even conducted two quality audits. The institute again successfully passed the regular control audit according to DIN/ISO 9001:2000. A total of three quality inspections within the last years testify the reliable solid continuity of FBH's research activities and its processing of orders from industry. The institute has been certified for the first time in December 2004.

Only fourteen days later, the FBH also completed the certification according to environmental management ISO 14001:2004. Consequently, the FBH persecutes typical environmental goals, as for example the reduction of resources (power, compressed air, etc.), further development of lead-free soldering and a consequent waste separation. The achieved goals in 2005 and 2006 such as adopted measures to reduce nitrogen were evaluated very positively.

Comparable to the implementation of quality standard ISO 9001:2000 three years ago, the ISO 14001:2004 certification also was a reaction to the requirements of FBH's industrial customers. Since the FBH, apart from its fundamental research program, strongly works demand-driven, these standards gain in importance. Often, the certification is a precondition to close industrial research contracts. Industry increasingly prefers partners in research with reliable and transparent quality standards as well as with a distinct commitment to environment-friendly policy.



■ **Familienfreundlichkeit am FBH:
vom Bezirk ausgezeichnet**

Das FBH bemüht sich, seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ein familienfreundliches Arbeitsumfeld anzubieten. Insbesondere Kolleginnen und Kollegen mit kleinen Kindern soll so die Balance von Familie und Arbeitswelt möglich werden. Die vielfältigen Maßnahmen wurden im Oktober 2006 vom Bezirk Treptow-Köpenick honoriert. Auf den Wirtschaftstagen wurde das FBH als familienfreundlichster Betrieb ausgezeichnet. So bietet das Institut beispielsweise flexible und individuelle Arbeitszeitvereinbarungen für Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit kleinen Kindern oder anderen familiären Verpflichtungen. Auch ein institutseigenes Kinderspielzimmer zur Überbrückung von Betreuungslücken steht zur Verfügung. Hilfestellungen und ein umfangreiches Informationsangebot rund um Kinder und Familie findet sich im Intranet.



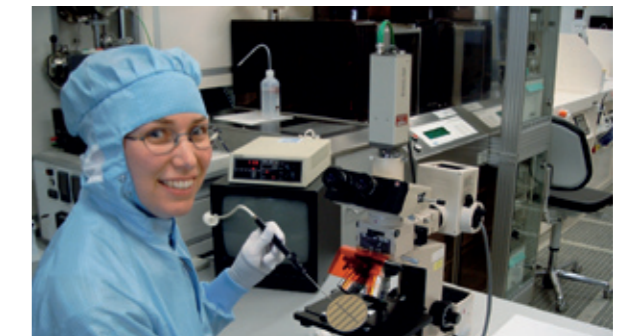
■ **Frauen auf den Plan gerufen:
Gleichstellung und Frauenförderung**

Das FBH will den Anteil von Frauen bei Fach- und Führungskräften im technischen und naturwissenschaftlichen Bereich schrittweise und nachhaltig erhöhen. Dies beinhaltet sowohl die Verbesserung der Zugangsbedingungen für Frauen als auch die gezielte berufliche Förderung und Aufstiegsmöglichkeiten von Frauen, die bereits am Institut tätig sind. Das FBH berücksichtigt dabei familiäre Verpflichtungen seiner Mitarbeiter und unterstützt die Vereinbarkeit von Familie und Beruf.

Um dies zu erreichen, wurden im Herbst 2005 Ute Zeimer zur Gleichstellungsbeauftragten und Katrin Paschke zu ihrer Stellvertreterin gewählt. Der 2006 von ihnen erstellte Frauenförderplan hat sich unter anderem zum Ziel gesetzt, den Frauenanteil bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern und bei Mitarbeitern in Leitungsfunktionen auf jeweils 15% zu erhöhen.

■ **Family Friendliness:
Awarded by the District**

The Ferdinand-Braun-Institut is committed to offering its employees a family-friendly workplace. FBH supports both female and male employees, especially when they are having little children, with the best benefits possible to enable a balanced work and private life. The various steps taken at the institute were officially approved in October 2006, when the district of Treptow-Köpenick awarded a prize to the FBH as the most family-friendly workplace in the district. The institute offers e.g. flexible and individual work options for employees with little children or other family responsibilities. Even a "children's room" is available in order to help the parents with child care vacancies. Comprehensive information and support dealing with children and family issues is provided in the intranet.



■ **Women at the Wheel:
Equal Opportunity and Women's Advancement**

The FBH intends to sustainably enhance the percentage of women in its scientific and technical field of work by supporting women in management and at executive level as well as in skilled work. This includes career entry as well as promotion prospects for women and applies to female staff already working for the institute and career starters or new colleagues alike. The FBH is considering family responsibilities of its employees and a balanced work and private life.

In autumn 2005, Ute Zeimer was elected as the institute's equal opportunity officer and Katrin Paschke as her substitute. Subsequently, in 2006 a plan for the women's advancement was established aiming to enhance the percentage of women to 15% in scientific staff and at executive level respectively.

■ **Vielfältig gefördert:
Nachwuchs am FBH**

**Gewerbliche Ausbildung &
wissenschaftlicher Nachwuchs**

Das FBH engagiert sich seit vielen Jahren in der gewerblichen Ausbildung und bildet jährlich drei bis vier Lehrlinge zu Mikrotechnologen mit Schwerpunkt Halbleitertechnik aus. Die Ausbildung dauert drei Jahre. Zusätzlich bildet die institutseigene Werkstatt des Ferdinand-Braun-Instituts auch jeweils einen Industriemechaniker aus. Für sein langjähriges Engagement im Bereich Ausbildung und Nachwuchsförderung wurde das FBH bereits einmal von der IHK ausgezeichnet. Die Ausbildungsleiterin Marlies Gielow ist außerdem Vorsitzende des Prüfungsausschusses für Mikrotechnologen.

Zahlreiche Informationsveranstaltungen wurden, meist in enger Zusammenarbeit mit dem Ausbildungsnetzwerk MANO (Mikrosystemtechnik-Ausbildung in Nord-Ostdeutschland, www.m-a-n-o.net), durchgeführt. Von den Tagen der Forschung in Adlershof bis hin zu Berufsfindungsbörsen beantworteten das FBH und MANO alle Fragen rund um Ausbildung und Studienmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik.

Studienwillige wurden von Günther Tränkle, der auch Professor für Mikrowellen- und Optoelektronik der TU Berlin ist, direkt an der Universität über Studienmöglichkeiten bei den Schülerinfotagen informiert. Weitere Wissenschaftler aus dem FBH beteiligen sich an verschiedenen Hochschulen aktiv an der akademischen Ausbildung und sichern durch ihre Lehrtätigkeiten die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Während und nach dem Studium bietet das FBH angehenden Wissenschaftlern vielfältige Möglichkeiten und Zukunftsperspektiven durch studentische Tätigkeiten sowie die Betreuung von Diplom- und Doktorarbeiten.

Dirk Rentner bei der Lehrlingsausbildung
Dirk Rentner instructing microtechnologists

■ **Multifaceted Encouragement:
Offspring at the FBH**

**Industrial Education &
Scientific Offspring**

Since a long time, three to four apprentices start every year a three year education term as microtechnologists with focus on semiconductor technology. In addition, the FBH also trains industrial mechanics in its own mechanical workshop. For its commitment since many years in educational training and support of young talents, the FBH was awarded by the IHK. Training officer Marlies Gielow above all is chairperson of the examination board for microtechnologists.

FBH also conducted numerous information meetings, often together with the microsystems technology network MANO (www.m-a-n-o.net). From research days in Adlershof to career prospect events, FBH and MANO answered all questions about educational training and study opportunities in microsystems technology.

Günther Tränkle, who is also a professor for microwave and optoelectronics at the Technische Universität Berlin, informed potential students about study opportunities. Further scientists from the FBH are teaching at different universities and thus ensure education of the scientific offspring. Additionally, FBH offers future scientists during or after their studies possibilities and prospects as work students and by mentoring of their thesis and doctorate.



■ **Schüler für Forschung begeistern**

Die Studentenzahlen sind gering, zahlreiche Ingenieurstellen bleiben unbesetzt und der Frauenanteil ist überproportional niedrig. So sieht die aktuelle Situation in vielen naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen aus. Damit sich das künftig ändert, ist das FBH im Rahmen verschiedener Initiativen, Kooperationen und Veranstaltungen aktiv, um Schülerinnen und Schüler möglichst frühzeitig für Naturwissenschaften zu begeistern. Die Inhalte werden lebendig und praxisnah vermittelt. Ganz nebenbei erleben die Jugendlichen, wie der Alltag an einer Forschungseinrichtung aussieht und lernen ein breites Spektrum an Berufsbildern kennen. Durch die Verbindung aus Theorie (so viel wie nötig) und Praxis (so viel wie möglich) bemüht sich das FBH um ein nachhaltiges Verständnis für naturwissenschaftlich-technische Themen.

**Schulpartnerschaft hilft
bei Berufsentscheidung**

Seit Ende 2004 besteht die Schulpartnerschaft des FBH mit der naturwissenschaftlich orientierten Alexander-von-Humboldt-Oberschule (AvH). Nicht nur die Berufsvorbereitung der Jugendlichen soll dadurch verbessert werden, auch die Wissensvermittlung selbst profitiert von der Zusammenarbeit. „Durch die Kooperation mit einer Forschungseinrichtung wie dem FBH können wir den naturwissenschaftlichen Fachunterricht unserer Schule sinnvoll ergänzen“, sagt Olaf Liebmann, Physiklehrer und Fachbereichsleiter Naturwissenschaft am AvH. Auch das Institut nutzt die Zusammenarbeit produktiv. Gemeinsam mit den Schülern werden Versuche und Demonstrationsobjekte entwickelt, die Grundprinzipien der Forschung am FBH veranschaulichen. Außerdem finden regelmäßige Institutsbesuche, Praktika und Projekte mit wissenschaftlicher Betreuung im Rahmen der Physik AG statt.

Schüler der AvH bei der „Langen Nacht der Wissenschaften“
Pupils from the AvH at the „Long Night of Sciences“

■ **Inspiring Pupils for Research**

School enrolment is low, many positions for engineers remain unoccupied and the quota of women is disproportionately low. That is today's condition in many natural scientific disciplines. Aiming to change this situation, the FBH is very active within the framework of various initiatives, cooperations and events to inspire pupils as soon as possible for science. Content is conveyed lively and practice-oriented, along the way the teenagers experience the everyday life at a research institute and learn more about a wide range of occupational images. By connecting theory (as much as necessary) and practice (as much as possible), FBH is striving for a profound understanding of natural scientific issues.

Scholar Partnership Helps with Occupational Decision

Since the end of 2004, the scholar partnership between the FBH and the natural sciences oriented Alexander-von-Humboldt-Oberschule (AvH) exists. Not only preparing the teenagers for a future career, but also imparting knowledge is the aim of the cooperation. „By working together with a research institute like FBH, we can reasonably complete the scientific lessons at school,“ says Olaf Liebmann, physics teacher and head of the natural science department at AvH. The institute on its part uses the collaboration with the school by developing demonstration objects together with the pupils showing the basic principles of FBH's research. In addition, pupils regularly visit the institute, conduct internships and projects with scientific supervision within the framework of the physics study group.



Schülerlabor MicroLAB: Spielerisch Zusammenhänge begreifen

Ob PC, Handy, ABS oder Airbagsysteme, kaum ein modernes technisches System kommt ohne die winzigen Alleskönner aus Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik aus. Wie solche Mikro-Bauteile hergestellt werden, vermittelt das Ende Oktober 2005 eingerichtete MicroLAB (www.microlab-berlin.de). Das Schülerlabor ist ein Kooperationsprojekt des FBH und der Lise-Meitner-Schule (LMS) in Berlin-Neukölln.

Schülergruppen ab der 10. Klasse führen in Laborräumen der LMS zunächst praktische Experimente durch. Dabei erzeugen die Schülerinnen und Schüler kleinste Strukturen auf einem Träger, den sie später mitnehmen können. Auf diese Weise erhalten sie eine Einführung in die typischen Arbeitsschritte bei der Strukturierung von Halbleiter-Bauelementen: Layoutentwicklung, Aufdampfen, Belackern, Belichten, Entwickeln und Ätzen. Bei der anschließenden Laborführung im FBH erfährt die Gruppe, wie diese Verfahren genutzt werden, um Hightech-Chips zu entwickeln und wie der Alltag an einer modernen Forschungseinrichtung aussieht.



Girls' Day: Frauen in die Forschung

Seit 2004 beteiligt sich das FBH am bundesweit stattfindenden Mädchenzukunftstag Girls' Day. Seither haben sich jedes Jahr etwa 60 bis 80 Mädchen zwischen elf und 18 Jahren für das abwechslungsreiche und praxisnahe Angebot begeistert. Begehrte waren vor allem die Besuche im Reinraum, das Hantieren mit Wafern und die praktischen Versuche, bei denen die Mädchen selbst Hand anlegen konnten. Besonders erfreulich ist, dass das eine oder andere Mädchen im nächsten Jahr als Praktikantin wiederkam.

School Lab MicroLAB: Hands-on Research

No matter if it is a computer, mobile phone, ABS or airbag system, nearly every modern technical solution needs the tiny all-rounders developed from micro electronics and microsystems technology. The school lab MicroLAB, which started in October 2005, explains and shows how such micro devices are manufactured. The laboratory is run by Lise-Meitner-Schule and Ferdinand-Braun-Institut jointly.

Starting with the 10th grade, pupils conduct experiments in the laboratory at the LMS. The girls and boys create tiny structures on a glass carrier, which they take at home afterwards. In doing so, they get an introduction into typical work steps of the structuring process of semiconductor devices: layout design, vaporization, exposure, development and etching. The group will be guided through the Ferdinand-Braun-Institut and its laboratories afterwards and thus learns how high-tech chips are developed professionally and how the everyday life at a modern research facility looks like.



Girls' Day: Women into Research

Since 2004, the FBH participates in the nationwide Girls' Day. From that time on, each year approximately 60 to 80 girls between eleven and eighteen years took part and appreciated the diversified and practice-oriented proposal. Highly demanded were visits in the clean room, the handling with wafers and hands-on experiments. Particularly joyful, that some of the girls conducted an internship later.

Forschung verstehen: FBH für die Öffentlichkeit

Seit vielen Jahren empfängt das FBH Besucher aus Politik und Wirtschaft, darunter prominente Gäste wie die Forschungsministerin Annette Schavan, den damaligen Bundeskanzler Gerhard Schröder und den Regierenden Bürgermeister von Berlin Klaus Wowereit.

Darüber hinaus öffnet das FBH seine Pforten auch für die breite Öffentlichkeit. Zur Langen Nacht der Wissenschaften bietet das FBH jedes Jahr einen umfassenden Einblick in die Welt der Hochfrequenztechnik. Gut 1.100 Besucher nutzten 2006 die Chance für einen Blick hinter die Kulissen. Das waren 400 Besucher mehr als 2005. Vor allem die Reinraumführungen waren heiß begehrt und die Kinderführungen schnell und lange im Voraus ausgebucht. Darüber hinaus zeigten Experimente und Exponate in den Laboren die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der leistungsstarken Minilaser und Mikrowellen-Bauelemente.

Am 15. Dezember 2006 war das FBH gemeinsam mit seinem Spin-off Jenoptik Diode Lab ausgewählter „Ort im Land der Ideen“. Das Konzept, wie aus Forschung Arbeitsplätze entstehen, überzeugte auch die Initiative unter der Schirmherrschaft des Bundespräsidenten Horst Köhler. Im Rahmen eines Tages der offenen Tür boten FBH und Jenoptik Reinraumführungen und Experimente zum Anfassen und Mitmachen.

Understanding Research: FBH for the Public

FBH welcomes visitors from politics and economics since many years, amongst others prominent guests such as Federal Research Minister Annette Schavan, the former Chancellor Gerhard Schröder and the Governing Mayor of Berlin Klaus Wowereit.

FBH opens its doors for the general public as well. At the "Long Night of Sciences", FBH offers each year a broad insight into the world of microwave technology and high-power diode lasers. In 2006, more than 1,100 visitors took their chance to catch a glimpse behind the curtain. This were 400 visitors more than in 2005. Especially the guides into the clean room for adults and children were fully booked quickly and well in advance. Further experiments and exhibits in the laboratories demonstrated the diverse possible applications of the powerful mini-lasers and microwave devices.

On December 15th, 2006 the FBH together with its spin-off Jenoptik Diode Lab was selected to be "Day in the Land of Ideas". The concept of how to create jobs out of research, convinced the jury under the patronage of Federal President Horst Köhler. Within the scope of an open day, FBH and Jenoptik offered clean room visits and hands-on experiments.



GESCHÄFTSFELDER & FORSCHUNG

■ BUSINESS SEGMENTS & RESEARCH AREAS

HOCHLEISTUNGSDIODENLASER
HIGH-POWER DIODE LASERS



■ Einführung Geschäftsfeld Hochleistungsdiodenlaser

Diodenlaser sind sehr kompakte Strahlquellen, die in vielfältigen Anwendungen, wie der optischen Nachrichtentechnik oder der Datenspeicherung eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch ihre kleinen Abmessungen, geringen Energieverbrauch, hohe Lebensdauern und Wartungsfreiheit bei relativ niedrigen Herstellungskosten aus. Damit können sie komplexe und teure Lasersysteme wie Gas- oder Festkörperlaser in vielen Einsatzfeldern ersetzen. Durch ihre Mobilität ergeben sich zusätzliche Anwendungsfelder.

Das Ferdinand-Braun-Institut ist bei der Erforschung und Realisierung von Hochleistungsdiodenlasern auf der Basis von Galliumarsenid eines der weltweit führenden Forschungsinstitute. Es entwickelt diese mit einer sehr großen Vielfalt von monolithischen und hybriden Bauformen und Materialkombinationen bei verschiedenen Wellenlängen.

Diodenlaser aus dem FBH sind Schlüsselkomponenten der optischen Technologien mit einem sehr breiten Einsatzbereich: u.a. als Pumplaser, in der Materialbearbeitung, in der Medizintechnik (Desinfektion, photodynamische Krebstherapie), in der Kommunikations- und Informationstechnik, in Sensorsystemen, in Weltraumanwendungen (für Atomuhren in GPS-Satelliten) und auch in Systemen der Grundlagenforschung (z.B. Röntgenlaser-Systeme und Systeme zur Emission von Terahertz-Strahlung). Neue Anwendungsfelder erschließt das FBH derzeit mit der Entwicklung grüner und blauer Diodenlaser auf der Basis von GaN für die Displaytechnologie (Laserfernsehen) und die Analytik.

Bei den Forschungsarbeiten des FBH erreicht das Institut immer wieder neue Bestmarken in Bezug auf Ausgangsleistung, Konversionseffizienz, Strahlqualität, Linienbreite und Zuverlässigkeit. Kürzlich wurden beispielsweise sehr leistungsstarke Breitstreifenlaser (4 W aus 100 μm @ 650 nm) und Minibarren (200 W aus 1,7 mm @ 940 nm) sowie Grundmode-Laser mit sehr guter Strahlqualität demonstriert (DBR-MOPA @ 980 nm; mit 8 W cw im Grundmode).

Das FBH deckt mit seinen Kompetenzen den gesamten Teil der Wertschöpfungskette von Simulation und Entwurf der Diodenlaser über die technologische Realisierung mittels Metallorganischer Gasphasenepitaxie und Halbleiterprozess-technologie bis zum Aufbau einsetzbarer Diodenlasermodule ab.

■ Introduction High-Power Diode Lasers

Diode lasers are very compact light sources suitable for various applications as for example in optical communications engineering and for data storage. They are maintenance-free and characterized by small dimensions, low energy consumption, high reliability at comparatively low manufacturing costs. These compact laser systems can replace bulky and expensive systems such as gas and solid state lasers in many fields of applications. As a result of their mobility, the range of use can be extended.

The Ferdinand-Braun-Institut is one of the worldwide leading institutes in research and development of gallium-arsenide based high-power diode lasers. FBH develops these lasers in a great variety of monolithic and hybrid designs and material combinations at different wavelengths.

Diode lasers from the FBH are key components in optical technologies with a wide range of applications, e.g. as pump sources, in materials processing, in medical technology (disinfection, photodynamic therapy), in communications and information technology, in sensors, in space applications (for atomic clocks in GPS satellites) and also in systems of basic research (e.g. X-ray laser systems and systems for the emission of terahertz radiation). Currently, FBH opens up new fields of applications with the development of green and blue GaN based diode lasers for display technology (laser TV) and analytics.

With its research, FBH establishes again and again new records regarding output power, conversion efficiency, beam quality, line width, and reliability. Recently, FBH demonstrated very powerful broad-area lasers (4 W from 100 μm @ 650 nm) and mini bars (200 W from 1.7 mm @ 940 nm) as well as single-mode lasers with an excellent beam quality (DBR-MOPA @ 980 nm; with 8 W cw in single-mode).

FBH covers with its competencies the whole range of the value chain, from simulation and design of the diode lasers, technological realization via metal-organic vapor phase epitaxy and semiconductor process technology, to the assembling of ready-to-use diode laser modules.

■ Zuverlässige 9xx nm – Hochleistungsdiodenlaser mit hohem Wirkungsgrad

Licht als Werkzeug hat viele Vorteile. Schweißen, Schneiden und Löten kann aufgrund der Flexibilität und der zeitlichen und räumlichen Kontrolle von Laserstrahlung mit nahezu beliebiger Präzision erfolgen. Licht nutzt sich nicht ab und ist ein unübertroffen schnelles Werkzeug.

Um dieses Licht mit hohem Wirkungsgrad, sehr zuverlässig und aus kompakten Geräten bereitstellen zu können, forscht das FBH an hocheffizienten Diodenlasern im Wellenlängenbereich von 9xx nm. Der rasche Fortschritt in der Technologie der Halbleiterlaserdioden ermöglicht heute einen zuverlässigen Betrieb dieser Lichtquellen über mehrere Jahre. Die Grundbauelemente sind Diodenlaserbarren mit 10 mm Apertur. Diese erlauben gegenwärtig 50 W mit einfacher Kühlung und circa 100 W mit aufwändiger Wasserkühlung unter Einsatz von Mikrokanalkühlern.

Das FBH hat erfolgreich 940 nm - Diodenlaserbarren für den Leistungsbereich $P \geq 70$ W entwickelt, die nur eine einfache Kühlung erfordern. Sie weisen dadurch eine große Zuverlässigkeit bei den typischen Wechselbelastungen, im Impulsbetrieb und im industriellen Einsatz auf. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Steigerung des Wirkungsgrades der Diodenlaserbarren von typisch 60% auf über 70%. Gegenwärtig erzielt das FBH Bestwerte von 73%. Trotz dieser hohen Effizienzen konnte die hohe Strahlqualität dieser Diodenlaser beibehalten bzw. sogar verbessert werden. So ist die vertikale Divergenz mit 45° für 95% der Lichtleistung sehr klein. Sie liegt um 25%...30% unter der Divergenz von effizienten Barren von anderen führenden Forschungsgruppen. Die laterale Divergenz ist mit 6° ebenfalls sehr klein.

Lebensdauertests über 10.000 h zeigten nur einen geringen Leistungsabfall, der noch deutlich unter dem zulässigen Wert von 20% liegt. Damit wurden die Grundlagen für eine industrielle Technologie gelegt, die erfolgreich an kommerzielle Nutzer transferiert werden konnte.

Design und Herstellungsprozess

Die kristallinen Schichtstrukturen werden mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie hergestellt. Wachstumsbedingungen, Ausgangsstoffe und das Schichtdesign wurden im Detail untersucht und optimiert. Die durch nichtstrahlende Rekombination entstehenden

■ Reliable 9xx nm – High-Power, High-Efficiency Diode Lasers

Laser light is a perfect tool in materials processing. Welding, cutting or soldering processes can be performed very precisely and flexibly due to the easy control of the light energy in space and time. Processing is fast and laser light shows no mechanical wear.

To provide this light from compact systems with high efficiency and high reliability FBH's research targets at power diode lasers with high efficiency in the wavelength range around 9xx nm. Due to the rapid progress in semiconductor laser technology a reliable operation of such diode lasers is now possible over years. Basic elements are diode laser bars with 10 mm aperture. When mounted with conductive cooling these bars emit 50 W optical power which can be raised to more than 100 W when the laser bars are soldered on water cooled microchannel mounts.

By optimizing the chip design as well as the mounting scheme FBH has successfully developed a new type of 940 nm diode laser bars with conductive cooling for an optical power of $P \geq 70$ W. The optimizations improve mainly the conversion efficiency of the diode laser chip to values beyond 70% (best value is 73%), exceeding standard bars by far (typical values of conversion efficiencies are 50%...60%). Despite these very high conversion efficiencies a very low vertical beam divergence and an excellent beam quality could be maintained or even improved; fast axis angles are around 45° for 95% power inclusion. These fast axis angle is about 25%...30% smaller than those of efficient laser bars developed by other leading research groups. Slow axis angles are 6° for 95% power inclusion; quite small values too.

Life tests of these diode laser bars showed a high reliability over 10,000 h, when the power drop was much smaller than 20%. These results prove the reliable basis of the technology which was already successfully transferred to industrial partners. The next objectives are further improvements towards 75% efficiency.

Design and fabrication

The layer structures are grown by metal organic vapor phase epitaxy. Growth conditions, metal organic precursors and the layer sequence have been investigated and optimized in detail. Optical losses due to nonradiative recombination could be reduced below 2%. Doping

Verluste konnten unter 2% (Messgrenze) reduziert werden. Das Dotierungsprofil wurde optimiert, um Verluste durch freie Ladungsträgerabsorption weitgehend zu vermeiden, aber auch um einen geringen Serienwiderstand zu garantieren.

Aus den Schichtstrukturen wurden Barren mit einer Breite von 10 mm und einer Länge von 1,5 mm hergestellt, wobei bei einer Belegungsdichte von 30% 19 Emittierer mit je 150 µm optisch wirksamer Streifenbreite angeordnet sind. Die Stromfenster sind durch Implantation definiert. Um die für industrielle Anwender wichtige Langzeitstabilität von 10.000 h und mehr zu erreichen, wurde ein vom FBH patentiertes Verfahren für die Passivierung der Resonatorspiegel (Kristallfacetten) eingesetzt. Diese sind sonst ein Schwachpunkt der Diodenlaser, da sie mit optischen Leistungsdichten bis zu 10 MW/cm² belastet werden.

Die Laserbarren sind mit AuSn-Lot auf ausdehnungsangepasste Wärmespreizer aus CuW-Sintermaterial mit einer relativ hohen thermischen Leitfähigkeit aufgelötet. Dieses Subensemble wird dann auf die eigentliche, aus Kupfer bestehende Wärmesenke aufgelötet. Der n-Kontakt wird durch Drahtbonden realisiert. Diese Montageart garantiert eine sehr hohe Stabilität im Langpulsbetrieb (Sekundentakt). Der thermische Widerstand ($R_{th} = 1...1,5 \text{ K/W}$) ist aber etwas höher als bei der üblicherweise eingesetzten direkten Lötung der Barren auf Kupferwärmesenken unter Verwendung von In-Lot und Klebung des n-Kontaktes ($R_{th} \leq 0,5 \text{ K/W}$). Es ist ein wesentlicher Vorteil der hohen Effizienz der Barren, dass diese sehr zuverlässige, aber thermisch etwas schlechtere Montagetechnik für industrielle Anwendungen zum Standard werden kann. Abbildung 1 zeigt das Bild eines montierten Barrens.

profiles have been optimized to reduce free carrier absorption, but to guarantee low series resistances.

Based on these layer structures laser bars of 10 mm width and 1.5 mm cavity length were fabricated. The layout of the bars includes 19 emitters with an optical aperture of 150 nm arranged with a pitch of 500 µm. Laser facets are passivated using FBH's patented coating with ZnSe prior to the reflection/antireflection coating to guarantee long-term stability even at very high facet loads beyond 10 MW/cm².

The laser bars are mounted on CuW heat spreaders using AuSn. The thermal expansion coefficient of CuW is perfectly matched to GaAs; CuW furthermore shows a high thermal conductivity. Using PbSn the CuW heat spreader is soldered on a copper heat sink with a footprint of 25 x 25 mm². Wire bonding is used for the n-contacts of the bars. This mounting technology based on the hard soldering process with AuSn yields laser bars with a very high reliability especially under long pulse operation (pulse length: 1 s). On the other hand a thermal resistance $R_{th} = 1...1.5 \text{ K/W}$ is obtained which is slightly higher than that obtained when In-soldering directly on Cu carriers and adhesive sealing of the n-contacts is used ($R_{th} \leq 0.5 \text{ K/W}$). It is one important benefit of the new laser bars that the impact of the thermal resistance is strongly reduced due to the superior conversion efficiency. Fig. 1 shows a mounted laser bar.

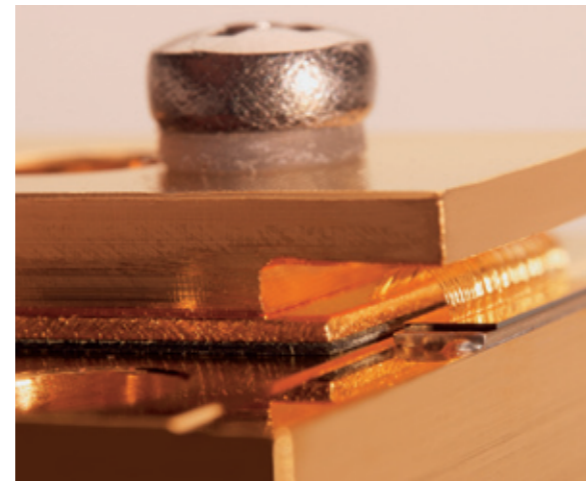


Abb. 1: Laserbarren montiert auf CuW - Wärmespreizer und Kupferwärmesenke.
Fig. 1: Laser bar mounted on CuW heat spreader and copper heat sink.

Leistungsdaten und Zuverlässigkeitstests

In Abbildung 2 sind die Kennlinien (Leistung, Spannung sowie Wirkungsgrad als Funktion des Betriebsstroms) dargestellt. Der Laserbarren zeigt einen Schwellenstrom von 7 A, einen Leistungsanstieg von 1,2 W/A und einen sehr geringen Serienwiderstand von 1,6 mΩ. Diese Daten führen trotz der thermisch relativ ungünstigen Montage zu einem Rekordwirkungsgrad von 73% bei 70 W Ausgangsleistung.

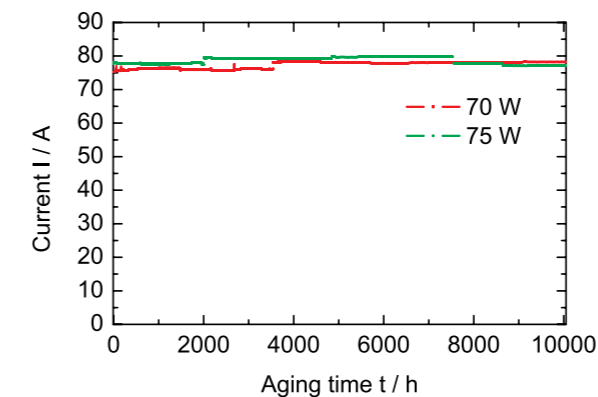


Abb. 3: Lebensdauerests von 940 nm Laserbarren bei Ausgangsleistungen von 70 W und 75 W.
Fig. 3: Life time test of 940 nm bars at 70 W and 75 W optical power.

Performance and reliability

In Fig.2 the laser bar characteristics are depicted (optical output power current, voltage and conversion efficiency as a function of laser current). The threshold current is about 7 A. The slope efficiency is 1.2 W/A and the series resistance has a very small value of 1.6 mΩ. Based on these data at 70 W optical output power a record value of 73 % for the conversion efficiency is achieved.

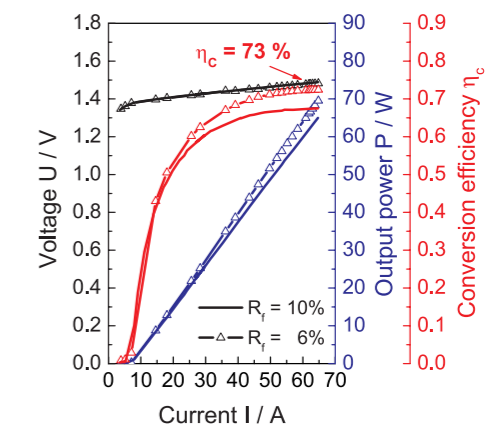


Abb. 2: Kennlinien von 940 nm Laserbarren, Optimierung der Facetreflektivität.
Fig. 2: Characteristics curves of 940 nm laser bars showing the impact of facet reflectivity.

Die Lebensdauer wurde sowohl im CW-Betrieb als auch unter gepulsten Bedingungen getestet. Die Abbildung 3 zeigt den Operationsstrom zweier Barren für 70 W bzw. 75 W über 10.000 h Betriebszeit. Die Änderungen betragen weniger als 5%. Das Ergebnis zeigt, dass diese Laserbarren ein hohes Potential zur Erzielung von Lebensdauern über 30.000 h haben, wenn man wie üblich konservativ über die dreifache Testzeit extrapoliert. Abbildung 4 zeigt die optische Leistung bei Anlegung von Stromimpulsen von zunächst 75 A, dann von 100 A über 10.000 h. Die Impulsdauer betrug ca. 300 ms, die Wiederholfrequenz 1,7 Hz. Aus dem Testverlauf ist für den Betrieb bei 100 A Operationsstrom eine Abnahme der optischen Leistung um weniger als 6% von 98 W auf 93 W zu erkennen. Auch mit diesen Daten ist ein zuverlässiger Einsatz im Leistungsbeereich 90 W...100 W von wenigstens 20.000 h möglich.

Life time tests were performed in CW and pulsed operation mode, respectively. Fig. 3 shows the operating current for two bars at 70 W and 75 W power respectively. Over 10,000 h operation time the increase of current is only 5%. Fig. 4 shows the optical power under pulsed operational current (300 ms, 1.7 Hz repetition rate). At a current of 100 A the power decreases from 98 W to 93 W over 10,000 h. In both operation modes there is a clear potential visible of more than 20,000 h life time under industrial conditions.

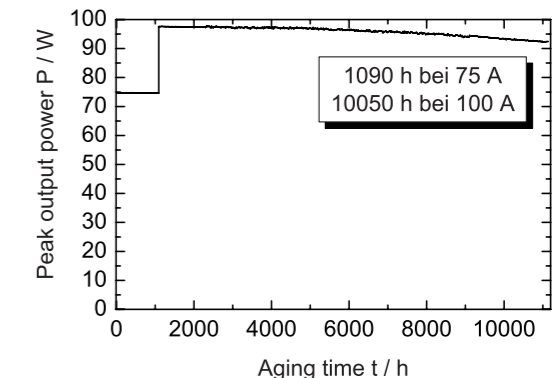


Abb. 4: Lebensdauerests von 940 nm Laserbarren im Langpulsbetrieb.
Fig. 4: Life time test of 940 nm laser bars under pulsed operation.

■ **Breitstreifenlaser und Barren im roten Spektralbereich ($\lambda \approx 652$ nm) für medizinische Anwendungen (photodynamische Krebstherapie)**

Die Entwicklung von Diodenlasern für den roten Spektralbereich ist auf Grund des vorhandenen III/V-Halbleitermaterials eine besondere Herausforderung. Es besteht nur eine geringe Barrierenhöhe, um die Ladungsträger in den Quantengraben einzufangen. Damit ist eine relativ hohe Stromdichte erforderlich bevor ein optischer Gewinn erreicht werden kann. Hinzu kommt noch, dass die eingesetzten quaternären Materialkombinationen eine relativ geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit haben. Das führt zu einem gegenüber den NIR-Diodenlasern tendenziell verringerten Wirkungsgrad und zu kleineren Ausgangsleistungen. Am FBH wurden verschiedene Schichtstrukturen untersucht und eingesetzt, um oben genannte Nachteile zu minimieren. Die lichterzeugende GaInP-Quantenwell-Struktur ist in AlGaInP-Wellenleiterschichten eingebettet. Die n-seitige Mantelschicht besteht aus AlInP. Die Forschungsarbeiten zu Grenzflächen zwischen arsenidischen und phosphidischen Schichten führten zu stabilen, kristallographisch nahezu perfekten Grenzflächen. Diese Arbeiten ermöglichten den erfolgreichen Ersatz der AlInP-Mantelschicht durch AlGaAs auf der p-Seite. Die eingesetzte AlGaAs-Schicht hat eine deutlich höhere thermische und elektrische Leitfähigkeit. Basierend auf dieser Schichtstruktur wurden Breitstreifenlaser und Barren hergestellt. Breitstreifenlaser wurden auf C-Mounts montiert (Abb. 1). Typische Kennlinien für Laserdioden mit 100 μ m Streifenbreite und 1,5 mm Resonatorlänge zeigt Abbildung 2.



Abb. 1: 650 nm - Breitstreifenlaser auf C-Mount.
Fig. 1: 650 nm - broad area laser on c-mount.

■ **Red Emitting Broad Area Lasers and Bars ($\lambda \approx 652$ nm) for Medical Applications (Photodynamic Therapy)**

Due to the properties of the III-V semiconductor materials, the design of red emitting diode lasers is challenging. There exists only a small barrier height to confine the carriers with the quantum wells. Therefore, a relatively high current density is necessary to reach optical gain. Moreover, the used quaternary materials have a comparatively poor electrical and thermal conductivity. Compared to NIR diode lasers, this results in a smaller conversion efficiency and smaller optical power. At FBH different layer structures were investigated to improve the laser parameters. As active region GaInP quantum wells embedded in AlGaInP waveguide layers were used. The n-side cladding layer is formed from AlInP. As a result of the research work crystallographically nearly perfect, stable interfaces between arsenic and phosphorus containing layers were obtained. This allows for the p-side cladding the replacement of an AlInP layer by AlGaAs. This layer has a significantly higher thermal and electrical conductivity. Based on the optimized layer structure broad area lasers and bars were manufactured. Figure 1 shows a broad area laser mounted on a c-mount. A typical power voltage current characteristic for such a laser diode with 100 μ m stripe width and a resonator length of 1.5 mm is given in Figure 2.

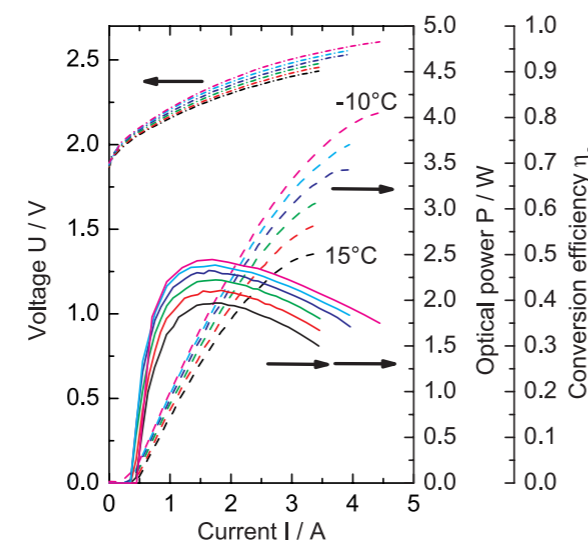


Abb. 2: Leistungs-Spannungs-Strom-Kennlinien eines Breitstreifenlasers bei 650 nm bei verschiedenen Temperaturen.
Fig. 2: Power-voltage-current characteristics for a broad area laser at 650 nm at different temperatures.

Die Laser erreichen maximale Ausgangsleistungen von 4 W bei -10°C und 2,5 W bei 15°C. Bei 15°C ist die Konversionseffizienz 39%, bei -10°C sogar 49%. Der Konversionswirkungsgrad von 39% liegt zwar immer noch deutlich unter den Bestwerten für 9xx nm-Diodenlaser, stellt aber in diesem Wellenlängenbereich den derzeitigen internationalen Rekordwert dar. Abbildung 3 zeigt eine Zuverlässigkeitsuntersuchung für diese Laser. 10 Dioden wurden bei T = 15°C und P = 1 W über 5000 h getestet. Innerhalb dieser Zeit trat kein Ausfall ein. Die besseren Daten konnten mit dem thermisch günstigeren Wärmespreizer aus CVD-Diamant erreicht werden, obwohl in dieser Montagevariante eine wesentlich stärkere mechanische Verspannung als bei dem ausdehnungsangepassten CuW-Wärmespreizer vorliegt. Da für medizinische Anwendungen typischerweise 1000 h Betriebszeit ausreichen, konnten diese Diodenlaser und deren Technologie für den Einsatz bei Kooperationspartnern im Rahmen des von der europäischen Union geförderten Projektes „www.bright.eu“ bereits zur Verfügung gestellt werden. Die Kennlinien im CW- und QCW-Betrieb für einen 5 mm breiten Barren mit 20% Füllfaktor (10 Emitter mit 100 μ m Streifenbreite) bei T = 15°C zeigt Abbildung 4. Im CW-Betrieb erreicht der Barren eine Ausgangsleistung P = 12,1 W, im QCW-Betrieb ($\tau = 150 \mu$ s, f = 10 Hz) eine Spitzenleistung von 55 W.

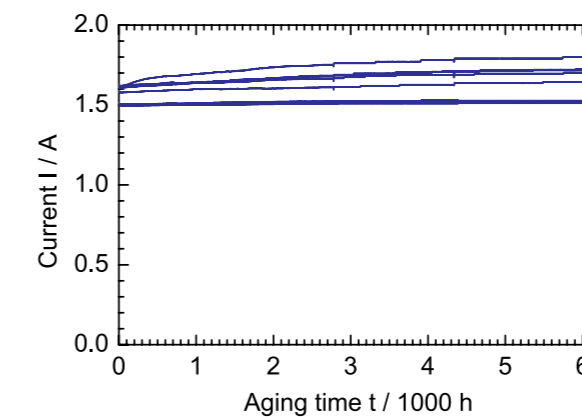


Abb. 3: Alterungsuntersuchung, 650 nm 100 μ m-BA-Laser, P = 1 W und T = 15°C.
Fig. 3: Reliability test for 650 nm broad area lasers 100 μ m x 1.5 mm at P = 1 W and T = 15°C.

A maximum output power of 4 W at -10°C and 2.5 W at 15°C was measured. At 15°C a conversion efficiency of 39% was measured, at -10°C even 49%. This conversion efficiency is still smaller compared to the high values for 9xx nm diode lasers, but represents for this wavelength region the record value. In Figure 3 an aging test for 10 diode lasers 100 μ m x 1.5 mm at T = 15°C and P = 1 W is shown. Over 5,000 h reliable operation without any failure could be demonstrated. More stable were the devices mounted on CVD diamond, which has a better thermal conductivity compared to the commonly used CuW. The larger difference in the thermal expansion coefficients between diamond and GaAs in comparison to the expansion matched CuW did not affect the reliability of the devices. For medical applications, the demonstrated lifetime fulfill the typical requirement of 1,000 h operational time. These diode lasers were delivered to project partners within the integrated project www.bright.eu, funded by the European Union. The power voltage current characteristics in CW and QCW operation for a 5 mm wide bar with a filling factor of 20% (10 emitter with 100 μ m stripe width) at T = 15°C is given in Figure 4. In CW operation, this bar reached a maximal output power of P = 12.1 W, in QCW mode with a pulse length $\tau = 150 \mu$ s at a repetition rate f = 10 Hz a peak power of 55 W.

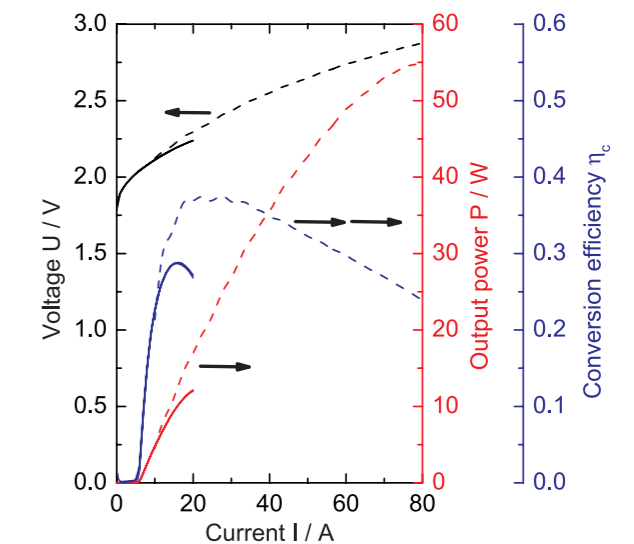


Abb. 4: Kennlinien für einen 5 mm Laserbarren (20% Füllfaktor) bei T = 15°C, CW-Anregung - durchgezogene Linie, QCW-Anregung (150 μ s, 10 Hz) - gestrichelte Linie.
Fig. 4: power-voltage-current characteristics for a 5 mm wide laser bar with 20% filling factor at T = 15°C, solid line - CW operation, dashed line - QCW operation (150 μ s, 10 Hz).

Die gezeigten Daten sowohl für Einzelemitter als auch für Barren zeigen die Einsatzfähigkeit der Diodenlaser für medizinische Anwendungen aber auch als Pumpquellen für kompakte fs-Lasersysteme basierend auf Cr:LiSAF-Laserkristallen.

Die Fortführung der Forschungsarbeiten zur Leistungssteigerung, Strahlqualität und Temperaturstabilität zielt auf neue Anwendungsmöglichkeiten in der Laser-Displaytechnologie.

Veröffentlichungen

B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, P. Ressel, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, „High-efficient 650 nm laser bars with an output power of about 10 W and a wall-plug efficiency of 30%“, Novel In-Plane Semiconductor Lasers V edited by Carmen Mermelstein and David P. Bour; Proceedings SPIE Vol. 6133, S. 78 - 85 (2006)

B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, P. Ressel, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, „5 W reliable operation over 2000 h of 5 mm wide 650 nm AlGaInP/GaInP/AlGaAs laser bars with asymmetric cladding layers“, IEEE Photonics Technology Letters 18, No. 18, S. 1955 - 1957 (2006)

B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, A. Ginolas, K. Häusler, W. Pittroff, P. Ressel, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, „650 nm InGaP broad area lasers with 5000 h reliable operation at 600 mW“, (IEEE Photonics Technology Letters 19, S. 118 - 120 (2007)

With the shown results for single emitters and bars, the applicability of these devices for medical applications but also as pump sources for compact fs-laser systems based on Cr:LiSAF crystals was proven.

In continuation of this research work towards higher output power, improved beam quality and superior temperature stability, FBH is aiming for new applications in laser display technology.

Publications

B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, P. Ressel, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, „High-efficient 650 nm laser bars with an output power of about 10 W and a wall-plug efficiency of 30%“, Novel In-Plane Semiconductor Lasers V edited by Carmen Mermelstein and David P. Bour; Proceedings SPIE Vol. 6133, pp. 78 - 85 (2006)

B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, P. Ressel, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, „5 W reliable operation over 2000 h of 5 mm wide 650 nm AlGaInP/GaInP/AlGaAs laser bars with asymmetric cladding layers“, IEEE Photonics Technology Letters 18, No. 18, pp 1955 - 1957 (2006)

B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, A. Ginolas, K. Häusler, W. Pittroff, P. Ressel, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle, „650 nm InGaP broad area lasers with 5000 h reliable operation at 600 mW“, IEEE Photonics Technology Letters 19, pp. 118 - 120 (2007)

935 nm QCW-Diodenlaserstacks

In vielen Einsatzgebieten, insbesondere bei Festkörperlasern hoher Impulsleistung im TW-Bereich müssen Halbleiterlaser nicht im Dauerstrichbetrieb (continuous wave, CW), sondern gepulst mit Tastverhältnissen von 1%...20% bei Impulslängen von 200 μ s bis 2 ms (quasi continuous wave, QCW) betrieben werden. In diesem Falle ist die Spitzenleistung hoch. Die mittlere Verlustleistung, welche im Chip selbst und über die Chipmontage abgeführt werden muss, ist mit dem Tastverhältnis reduziert. Die erzielbare optische QCW-Leistung aus dem gleichen Bauelement ist im Vergleich zur Leistung bei CW-Betrieb wesentlich höher, sofern die Stabilität der Laserfacetten die höhere optische Leistungsdichte zulässt. Es ist notwendig und sinnvoll speziell für den QCW-Betrieb optimierte Bauelemente zu entwickeln, die dann neue, bisher nicht erreichte Leistungsdaten ermöglichen, auch bei Einsatz von vereinfachten und kostengünstigen Montagetechniken.

In einem Teilvorhaben des Projektverbundes „Röntgenlaserstation“, welcher im Rahmen des ProFIT-Programms des Landes Berlin finanziert wird, entwickelt das FBH ein derartig optimiertes Diodenlasermodul, das als Pump laser für Festkörperlasersysteme zur Erzeugung von Röntgenlaserstrahlung dienen wird.

Bei dem eingesetzten Halbleiterchipmaterial zielt die Optimierung auf folgende Parameter:

- Geringe laterale Apertur durch höhere Belegungsdichte der Minibarren-Chips: Ausgangsleistungen > 100 W bei nur 1,7 mm Apertur.
- Geringe vertikale Divergenz durch sehr dicke Wellenleitschichten in der Epitaxiestructur (super large optical confinement, SLOC): Vertikaler Fernfeldwinkel (Halbwertsbreite) von 14°
- Wirkungsgrad nahe 60%.

Die Kombination dieser Werte führt zu neuartigen Bauelementen und Modulen, da Diodenlaser mit vergleichbar geringer Divergenz bisher immer nur Wirkungsgrade von maximal 40% erreichten und damit für den Hochleistungsbetrieb in der geplanten Anwendung nicht tauglich sind.

935 nm QCW Diode Laser Stacks

Many applications of laser light require high peak power pulses up to the TW range at a relatively low duty cycle. Solid state lasers pumped by diode lasers with a pulse length between 200 μ s and 2 ms (quasi continuous wave operation mode, QCW) are the typical choice for such laser sources. The peak power of the diode lasers is quite high, however the average power is strongly reduced by the low duty cycle. If the stability of their facets and the design of the diode lasers are well developed, the QCW peak power can be increased significantly. The requirements in the two operating modes (CW and QCW) are so different, that the customized development of a special QCW diode laser is reasonable. Higher peak powers will be achieved and simplified at the same time. Even low cost-efficient mounting schemes will be possible.

Within the project “Röntgenlaserstation” (“X-ray laser”) funded within the framework of the ProFIT program of the State of Berlin, FBH works on the development of a new, highly efficient and low-priced technology for QCW diode laser pump modules. These modules will be used for a high peak power laser system to generate X-ray radiation. FBH will deliver such modules to the project partner Max-Born-Institute (MBI).

The following features are results of a special development of semiconductor chips for the QCW mode of operation:

- > 100 W peak power from a small lateral aperture of 1.7mm only. Such a power is usually achieved from 10 mm bars
- very narrow vertical divergence (14° FWHM, < 25° including 95% of power)
- conversion efficiency of nearly 60%

The first two features result from the development of a special waveguide structure with very thick core layers. Remarkable is the outstanding high-conversion efficiency in combination with the benefits of this waveguide structure.

Abb. 1 zeigt, dass die Stabilität der Laserfacetten problemlos optische Leistungen bis 200 W zulässt. Bis zu 150 W liegt der Konversionswirkungsgrad der Minibarren deutlich über 50%.

Für die Montage der Pumpmodule wurden neue Lösungen entwickelt:

- Hartlöten der Chips mit AuSn-Lot auf massiven CuW-Trägern zur passiven Kühlung durch Wärmeleitung – ohne Einsatz von kostspieligen und anfälligen Mikrokanalkühlern
- Stapeln dieser CuW-Träger und Fixieren mit AuSn-Lot zu einem kostengünstigen, einfach aufgebauten Laserstack, geeignet auch für Temperaturwechselbelastungen bei optischen Leistungen von $P > 1$ kW

Diese Module bestehen nur aus Materialien mit einem nahezu identischen thermischen Ausdehnungskoeffizient. Dadurch kann eine sehr hohe Stabilität der Module gegenüber Umwelteinflüssen gesichert werden.

Abb. 2 zeigt einen Stack mit 12 aktiven Ebenen und die zugehörigen Kennlinien. Ohne aktive Kühlung können sie mit 1% Tastverhältnis gemessen werden. Tastverhältnisse bis 20% sind zulässig, wenn die im Laserstack entstehende Wärme effizient abgeführt werden kann. Abb. 3 zeigt einen Laserstack mit einer von Jenoptik montierten Kühlung. Am FBH werden die zu jeder Stackebene individuell justierten FAC-Linsen (Kollimation der senkrechten Divergenz, fast axis collimation) angefügt.

Ziel der weiteren Optimierung der Stacklötung ist es, die Positioniergenauigkeit der Elemente so weit zu verbessern, dass anstelle der einzelnen Linsen ein FAC-Array vor dem gesamten Stack montiert werden kann. Neben der Positioniergenauigkeit spielt dabei die geringe Divergenz der Diodenlaser eine entscheidende Rolle.

Die folgenden Strahlparameter sind für einen Stack mit 12 Ebenen und einer optischen Leistung > 1 kW spezifiziert:

- Vertikale Divergenz ($> 96\%$ Lichtleistung): 7 mrad \Rightarrow Strahlparameterprodukt: 58 mm-mrad
- Laterale Divergenz ($> 96\%$ Lichtleistung): 227 mrad \Rightarrow Strahlparameterprodukt: 93 mm-mrad

Figure 1 demonstrates that 200 W output power could be achieved without any problems from such small aperture. Up to 150 W the conversion efficiency is well above 50%.

For the fabrication of the pump modules a new mounting technology was developed:

- chip mounting with hard AuSn-solder on compact CuW carriers to achieve passive cooling by heat conductance – the use of expensive and delicate micro channel coolers can be avoided
- stacking of these CuW carriers and fixing with AuSn solder: a simple, low-cost stack is obtained which can be used under rough thermal cycling at optical output powers beyond $P > 1$ kW

These pump modules only consist of materials with an almost identical thermal expansion coefficient. Therefore a very high stability of the modules against environmental influences can be assured.

Figure 2 shows a stack with 12 elements and the power current characteristics of such a module. An output power of more than 1.2 kW was achieved with a duty cycle of 1% without any additional cooling efforts. Efficient cooling can be achieved by soldering of heat exchangers onto both sides of the stack. This work was done in cooperation with Jenoptik. The vertical beams of the diode lasers are then collimated by FAC lenses which are adjusted and mounted for every single stack element. In figure 3 a complete module is shown.

The beam quality of such a module can be specified at 1 kW output power:

- Beam parameter product vertical: ≤ 60 mm-mrad
- Beam parameter product lateral: ≤ 95 mm-mrad

These values are well suited for coupling to an optical fiber with 1.2 mm core diameter and a NA of 0.2 (BPP 120 mm-mrad). Furthermore, the beam diameter of a single element is only a half of the vertical distance between neighboring stack elements. The power in the fibre can be doubled by combining two stacks simply by a vertical offset and the redirection of one stack by 90° . Additionally more sophisticated schemes like polarisation coupling and wavelength multiplexing can increase the power to the 5 kW range.

Mit diesen Werten kann das emittierte Licht mittels eines kostengünstigen abbildenden Verfahrens (ohne aufwändige Strahlformung) in eine 1,2 mm-Multimodefaser eingekoppelt werden (Strahlparameterprodukt der Faser: 120 mm-mrad). Zur Erzielung von Leistungen > 2 kW am Faserausgang ist es wegen der Abstände zwischen den Stackebenen zudem möglich, zwei Stacks mit einer 1,2 mm-Faser kostengünstig zu koppeln. Komplette 1 kW-Pumpmodule als 19"-Einschübe mit Kühlwasser- und Netzeingang sowie Faserausgang für 1 kW optische Pumpleistung werden im Projektverbund mit dem Max-Born-Institut zum Pumpen eines Festkörperlaser-Systems künftig für die Erzeugung stimulierter Röntgenstrahlung zur Verfügung gestellt.

Due to the outstanding narrow divergence and a high reproducibility of stack mounting otherwise, further steps of improvement towards a low cost module are possible. In the next step, instead of single FAC lenses a FAC array will be used. This replacement will allow an even simpler mounting process.

Within the project, FBH will supply the partner MBI with complete modules for 25 kW pump power delivered by fiber to run the high-power solid state laser system.

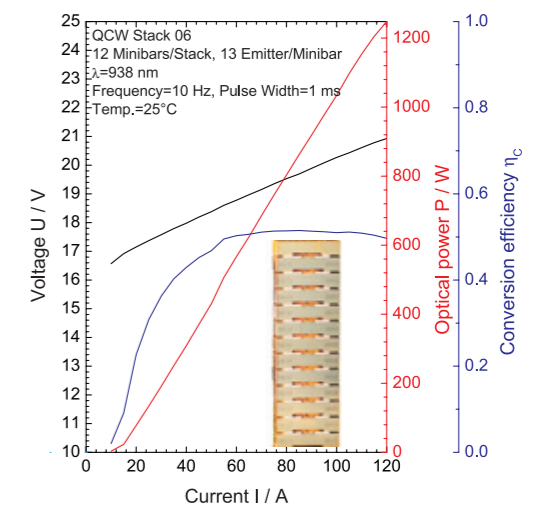


Abb. 2: Kennlinien eines QCW-Stack. Das eingesetzte Foto zeigt den Stack ohne FAC-Linsen, wie er in ein Pumpmodul eingebaut wird. Fig. 2: Characteristics curves (power, voltage, conversion efficiency versus current) of a 935 nm QCW stack. The inset shows the mounted stack.

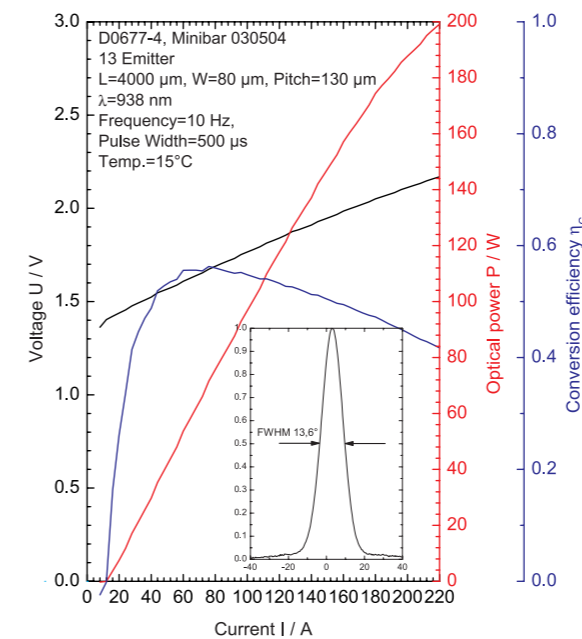


Abb. 1: Kennlinien eines 935nm - QCW - Minibarren. Der Einschub zeigt die vertikale Fernfeldverteilung. Fig. 1: Characteristics curves of a 935 nm QCW diode laser. The inset show the vertical far field distribution.

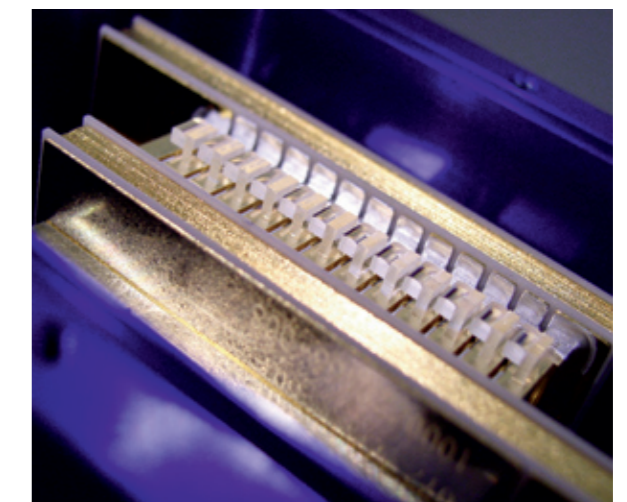


Abb. 3: Teilansicht eines Pumpmoduls mit QCW-Stack, seitlich angeordneten Kühlkörpern und FAC-Linsen. Fig. 3: 935 nm pump module showing the mounted FAC lenses and the heat exchanger on both sides of the stack.

■ Hochleistungs-DFB-Laser

Wellenlängenstabilisierte Diodenlaser sind für eine Reihe von Anwendungen interessant. So können sie in der Datenübertragung, zum Pumpen von Faser-Verstärkern und Nd:YAG Festkörperlaser, zur nichtlinearen Frequenzkonversion, in der Spektroskopie, zur Laserkühlung und in Atomuhren eingesetzt werden. Die herkömmliche Wellenlängenstabilisierung von Hochleistungs-Diodenlasern durch den Einsatz von Gittern in einer externen Resonatoranordnung erfordert eine sorgfältige Abschirmung gegenüber äußeren Störungen. Eine moden-sprungfreie Durchstimmbarkeit ist nur sehr aufwändig erreichbar. Im Gegensatz dazu sind Laserdioden mit einem integrierten Gitter deutlich kompakter, unkomplizierter in ihrer Handhabung und wesentlich einfacher durchstimmbar. Eine in dieser Hinsicht besonders geeignete Ausführung ist der sogenannte „Distributed Feedback Laser“ (Laser mit verteilter Rückkopplung, DFB-Laser), bei dem ein Bragg-Gitter über den gesamten aktiven Resonator in die Halbleiterschichtstruktur integriert ist.

Am FBH wurden AlGaAs-basierte DFB-Laser mit Al-freien Gitterschichten, welche in die p-dotierten Bereich der Halbleiterschichtstruktur eingebettet sind, entwickelt. Die Bragg-Gitter werden holografisch mit einem frequenzvervielfachten Nd:YAG-Laser (Emissionswellenlänge 266 nm) definiert. Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme in Abb. 1 zeigt ein auf diese Art hergestelltes Bragg-Gitter im Querschnitt. Die Kopplungsstärke des Gitters kann durch eine Variation des Abstandes von der aktiven Schicht eingestellt werden.

Die Entwicklung der Hochleistungs-DFB-Laser wurde durch das im Rahmen des ProInno-Programms des Bundesministeriums für Wirtschaft geförderten Projektes „HYBLA“ (Hybrider blauer Laser) begonnen und durch das vom Zukunftsfond Berlin und aus EFRE-Mitteln finanzierte Projekt „TOB“ (Terabit Optics Berlin) weitergeführt. Gegenwärtig werden im Auftrag der Firma eagleyard Photonics Berlin GmbH maßgeschneiderte DFB-Laser für eine Reihe von Anwendungen entwickelt.

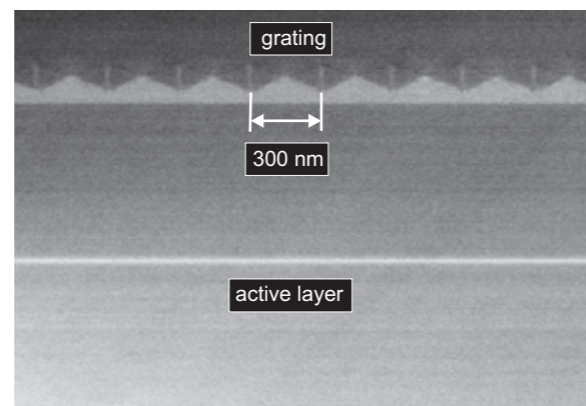
Abb. 1: REM-Aufnahme des Querschnittes einer Epitaxialstruktur mit überwachsenem Bragg-Gitter (oben) und der aktiven Schicht (unten).
Fig. 1: SEM picture of the cross section of the epitaxial layer structure showing the buried second order Bragg grating (top) and the active layer (bottom).

■ High-Power DFB Lasers

Wavelength-stabilized diode lasers can be used for a number of applications, such as communications, pumping of fiber amplifiers and Nd:YAG solid state lasers, non-linear frequency conversion, spectroscopy, laser doppler cooling and state selection and detection in atomic clocks. Although wavelength stabilization can be achieved with gratings in an external cavity configuration, the complex tuning mechanism is necessarily expensive and sensitive to external perturbations. A monolithic device that offers comparable or even superior properties to an external cavity system is a distributed-feedback (DFB) laser, where a Bragg grating is integrated into the active semiconductor cavity. DFB lasers are reliable, mechanically stable, and can operate mode-hop free over a large tuning range.

We have developed AlGaAs based DFB lasers with Al-free grating layers embedded in the p-type layer sequence. The Bragg gratings are defined by holographic photolithography using a frequency quadrupled Nd: YAG laser with an emission wavelength of 266 nm. The scanning electron microscope (SEM) picture depicted in Figure 1 shows a cross-sectional view of the epitaxial layer structure with the embedded Bragg grating. The coupling strength of the grating can be easily adjusted by its distance to the active layer.

The development of the high-power DFB lasers was initiated with the project “HYBLA” (HYbrid Blue LAser, funded by BMWi-ProInno, together with Crystal GmbH Berlin) and was continued within the project “TOB” (Terabit Optics Berlin, funded by EFRE and Zukunftsfond Berlin). Currently it is pursued in subcontracts obtained from eagleyard Photonics GmbH.



Durch Variation der Gitterperiode und der Komposition der aktiven Schicht kann eine Variation der Emissions-Wellenlänge der DFB-Laser zwischen 750 und 1100 nm erreicht werden. Abb. 2 zeigt die am FBH maximal erreichte Ausgangsleistung von sogenannten RW-DFB-Lasern. Diese Laser besitzen einen schmalen 2 bis 3 µm breiten Rippenwellenleiter (RW), wodurch nur die räumliche Grundmode anschwingt. Dies führt zu einer beugungsbegrenzten Laseremission und zu einer extrem schmalen spektralen Linienbreite im Bereich 1 MHz, die momentan eher durch Stromrauschen, externe Rückwirkung und Temperaturstabilisierung als durch den Diodenlaser selbst limitiert ist.

Abb. 3 zeigt die Kennlinie und das optische Spektrum eines bei 980 nm emittierenden RW-DFB-Lasers mit einer Resonatorlänge von 3 mm und einer RW-Breite von 2,2 µm, welcher mit der Epitaxieseite auf einem CuW-Zwischenträger und dieser auf eine C-Mount-Wärmesenke gelötet wurde. Bei 1,5 A beträgt die Ausgangsleistung mehr als 900 mW - ein Rekordwert für einen RW-DFB-Laser. Bis zu einer Leistung von 700 mW ist der Laser spektral monomodig mit einer Seitenmodenunterdrückung von mehr als 60 dB, wie die Grafik zeigt. Die gemessene spektrale Breite der Lasermode ist durch den optischen Spektrenanalysator begrenzt.

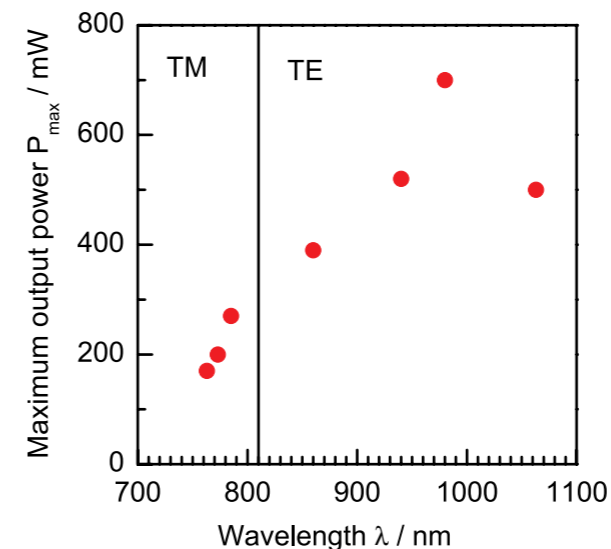


Abb. 2: Maximale Ausgangsleistung, bei RW-DFB-Lasern verschiedener Wellenlängen in einer räumlich-spektralen Grundmode. Für Wellenlängen unterhalb von 810 nm ist die Laseremission transversalmagnetisch (TM) polarisiert.
Fig. 2: Maximum output powers achieved with RW-DFB lasers in the spatial-spectral fundamental mode at different wavelengths. For wavelengths below 810 nm, the laser emission is transverse-magnetic (TM) polarized.

By varying the grating period and the composition of the active layer, any desired emission wavelength in the range between 750 and 1100 nm can be obtained. Fig. 2 shows the maximum output power achieved at the FBH with so-called RW-DFB lasers. These lasers have a small, only 2 or 3 µm wide ridge waveguide (RW) which favors the lasing of the fundamental lateral mode. This leads to diffraction-limited laser emission and an extremely small spectral linewidth of around 1 MHz, limited not by the internal noise of the laser diode but by current noise, external feedback and insufficient temperature stabilization.

Figure 3 shows the light-current characteristics and the optical spectrum of a RW-DFB laser emitting near 980 nm. Cavity length and RW width are 3 mm and 2.2 µm, respectively. The laser was soldered p-side down on a CuW carrier which was then mounted on a C-mount heat sink. At a current of 1.5 A an output power of 900 mW was reached, a record value for a RW-DFB laser. The optical spectrum depicted in the inset reveals single longitudinal mode emission with a side mode suppression ratio greater than 60 dB at an output power of 700 mW. The spectral line width is limited by the optical spectrum analyzer.

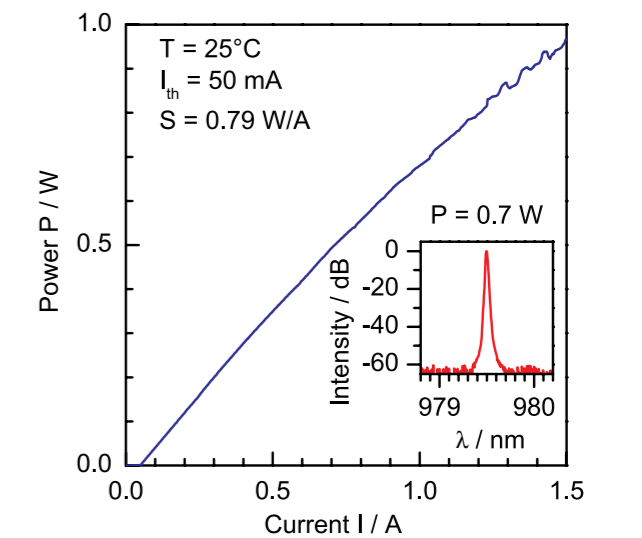


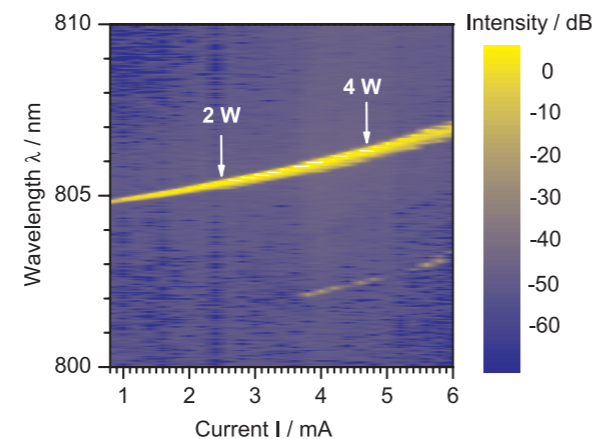
Abb. 3: Leistungs-Strom-Kennlinie eines bei 980 nm emittierenden RW-DFB-Lasers. Die Grafik zeigt das optische Spektrum bei einer Ausgangsleistung von 700 mW.
Abb. 3: Light-current characteristics of a 980-nm RW-DFB laser with a cavity length of 3 mm. Inset: Optical spectrum at an output power of 700 mW.

Eine weitere Leistungssteigerung ist mit sogenannten Breitstreifenlasern (BA-Laser, von „Broad Area“) möglich. Aufgrund des zwischen 30 und 200 μm breiten aktiven Gebietes lassen sich Ausgangsleistungen von mehreren Watt erreichen. Ein bei 800 nm emittierender BA-DFB-Laser mit einer Resonatorlänge von 3 mm und einer Streifenbreite von 100 μm erreicht eine maximale Ausgangsleistung von 4,7 W, die durch ein thermisch bedingtes Überrollen der Kennlinie begrenzt ist. Abb. 4 zeigt ein Falschfarben-Mapping des optischen Spektrums als Funktion des Stromes. Man erkennt einen durchgängig schmalen Streifen hoher Intensität. Bei 4 W Ausgangsleistung, welche bei einem Strom von 4,7 A erreicht wird, befinden sich mehr als 95% der Intensität innerhalb einer spektralen Breite von 0,3 nm. Diese spektrale Breite ist für viele Anwendungen wie z.B. das Pumpen von Nd:YAG-Lasern optimal. Die Verschiebung der Zentrumswellenlänge mit zunehmendem Strom ist durch die Selbsterwärmung des Lasers bedingt.

Abb. 4: Falschfarben-Mapping des optischen Spektrums eines BA-DFB-Lasers als Funktion des Stromes.

Fig. 4: Color-scale plot of the optical intensity of a BA laser versus wavelength and current.

A further power rise is possible with so called broad area (BA) lasers. Due to the 30 to 200 μm wide contact stripes output powers of several watts can be obtained. A BA-DFB laser with a cavity length of 3 mm and a stripe width of 100 μm reaches a maximum power of 4.7 W, limited by thermal rollover. A color-scale mapping of the optical spectrum depicted in Fig. 4 shows a small stripe of high intensity. At a power of 4 W, reached at a current of 4.7 A, more than 95% of the intensity is irradiated within a spectral width of 0.3 nm. This spectral width is optimum for a number of applications such as the pumping of Nd:YAG lasers. The shift of the central wavelength with current is caused by the self-heating of the laser diode.



Veröffentlichungen

H. Wenzel, A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, B. Sumpf, M. Weyers, G. Tränkle, „Design and realization of high-power DFB lasers“, Proceedings SPIE, vol. 5595, S. 110 - 123, 2004.

H. Wenzel, A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Klehr, A. Knauer, M. Weyers, G. Tränkle, „High-Power 783-nm Distributed-Feedback Laser“, Electronics Letters, vol. 40, S. 123 - 124, 2004.

H. Wenzel, J. Fricke, A. Klehr, A. Knauer, G. Erbert, „High-Power 980-nm DFB RW Lasers with a Narrow Vertical Farfield“, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 18, vol. 6, S. 737 - 739, 2006.

Publications

H. Wenzel, A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, B. Sumpf, M. Weyers, G. Tränkle, „Design and realization of high-power DFB lasers“, Proceedings SPIE, vol. 5595, pp. 110 - 123, 2004.

H. Wenzel, A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Klehr, A. Knauer, M. Weyers, G. Tränkle, „High-Power 783-nm Distributed-Feedback Laser“, Electronics Letters, vol. 40, pp. 123 - 124, 2004.

H. Wenzel, J. Fricke, A. Klehr, A. Knauer, G. Erbert, „High-Power 980-nm DFB RW Lasers with a Narrow Vertical Farfield“, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 18, vol. 6, pp. 737 - 739, 2006.

A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, H. Wenzel, G. Tränkle, „High power ridge waveguide lasers, broad area lasers and laser arrays with a DFB resonator in the wavelength range 760-790nm“, Proceedings SPIE, vol. 5738, S. 416 - 424, 2005.

A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, A. Knauer, P. Ressel, H. Wenzel, G. Tränkle, „High power broad area 808 nm DFB lasers for pumping solid state lasers“, Proceedings SPIE, vol. 6133, S. 61330F-1 - 61330F-10, 2006.

▀ Trapezlaser

Hochleistungslaserdioden mit hoher Strahlqualität sind ein wichtiger Schwerpunkt der Forschungsarbeiten am FBH. Typische Hochleistungsdiodenlaser auf der Basis von Breitstreifenlasern (BA) haben eine Abstrahlcharakteristik, die je nach Leistung 10 bis 1000-fach schlechter als die beugungsbegrenzte Strahlqualität ist. Rippenwellenleiterlaser (RW) mit schmalen Streifen emittieren nahezu beugungsbegrenzt, sind aber auf ein Watt Ausgangsleistung durch die geringe Apertur beschränkt. Zielstellung der Forschungsarbeiten ist es, Resonatorkonfigurationen zu finden, die Ausgangsleistungen im Bereich von 5 W ... 10 W mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität ermöglichen.

Ein viel versprechender Ansatz sind dabei die Trapezlaser. Der Laser besteht aus einem index-geführten geraden Rippenwellenleiter (RW-Sektion) und einer gewinngeführten Trapezsektion. Das Design der RW-Sektion, z.B. die Länge und der effektive Indexsprung, aber auch die Auswahl eines geeigneten Trapezdesigns bestimmt die erreichbare Ausgangsleistung und die Strahlqualität. Diese Laserstrukturen werden als Verstärker oder als optisches Gewinnmedium in externen Resonatoren benutzt.

Die Herstellung von Trapezlasern kombiniert die typischen Prozessschritte für RW- und BA-Laser. Die RW-Sektion wird durch eine tiefe Ätzung erzeugt. Das Trapez kann entweder durch Ätzung einer Mesastruktur oder durch Implantation erzeugt werden.

In den letzten Jahren wurden am FBH erfolgreich Trapezlaser und Trapezverstärker im Wellenlängenbereich zwischen 730 nm und 1080 nm mit Ausgangsleistungen von einigen Watt im Dauerstrich-Betrieb demonstriert. Die hier vorgestellten aktuellen Ergebnisse betreffen gepulste 808 nm Trapezlaser im Leistungsbereich > 10 W für die Frequenzkonversion und monolithische Trapezlaser mit interner Wellenlängenstabilisierung bei 976 nm.

A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, H. Wenzel, G. Tränkle, „High power ridge waveguide lasers, broad area lasers and laser arrays with a DFB resonator in the wavelength range 760-790nm“, Proceedings SPIE, vol. 5738, pp. 416 - 424, 2005.

A. Klehr, M. Braun, F. Bugge, G. Erbert, A. Knauer, P. Ressel, H. Wenzel, G. Tränkle, „High power broad area 808 nm DFB lasers for pumping solid state lasers“, Proceedings SPIE, vol. 6133, pp. 61330F-1 - 61330F-10, 2006.

▀ Tapered Lasers

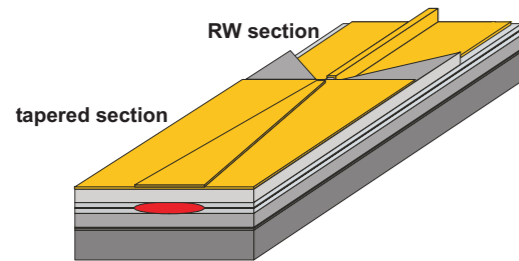
Research on high-power diode lasers with a good beam quality is a main focus at the FBH. The beam characteristics of typical high-power diode lasers on the basis of broad area (BA) lasers are by a factor of 10 to 1000 worse than the diffraction limit, depending on the output power. Although the emission of ridge-waveguide (RW) lasers with a small contact stripe is almost diffraction-limited, their output power is restricted to about 1 W due to the small aperture. It is an aim of the current research to investigate laser cavities in order to enable output powers in the range between 5 and 10 W with nearly diffraction-limited beam quality.

A promising approach is the so called tapered laser. The laser consists of an index guided RW section and a gain guided tapered section. The design of the RW section, e.g. its length and the effective index step, but also the appropriate choice of the parameters of the tapered section determine the maximum output power as well as the beam quality. These devices can also be used as amplifiers or as gain elements in external cavity configurations.

The fabrication of tapered lasers combine the typical processing steps of RW and BA lasers. The RW is formed by etching of deep grooves. The tapered contact is defined either by etching of a low mesa or by implantation.

During the last years, at the FBH tapered lasers and amplifiers emitting a continuous wave (cw) power of several watts in the wavelength range between 730 and 1080 nm were successfully demonstrated. The results presented here refer to pulsed 808 nm tapered lasers for the power range > 10 W used for frequency conversion and monolithic tapered lasers with internal wavelength stabilization emitting near 976 nm.

Applications in non-linear frequency conversion require high peak powers, a small vertical divergence and a



Schema eines Trapezlasers.
Scheme of a tapered laser.

Für Anwendungen zur nichtlinearen Frequenzkonversion im Rahmen des EU-Projektes WWW.BRIGHTER.EU, in dem hohe Spitzenleistungen, eine geringe vertikale Divergenz und hohe Strahlgüte gefordert sind, wurden 808 nm Trapezlaser entwickelt. Ausgangspunkt war eine Laserstruktur mit einem Divergenzwinkel von nur 18° (FWHM). Aus diesem Material wurden dann 4 mm lange Trapezlaser mit einer Länge der Trapezsektion von 3 mm und einem Trapezwinkel von 6° hergestellt.

Eine typische Kennlinie im Impulsbetrieb ($\tau \approx 100$ ns, $f = 1$ kHz) ist in der Abbildung 1 dargestellt. Der Schwellenstrom beträgt 1,8 A und die Steilheit 1,2 W/A. Eine maximale Ausgangsleistung von 27 W konnte bei einem Strom von 25 A erreicht werden. Dies ist die bislang höchste erreichte Spitzenleistung für 808 nm Trapezlaser.

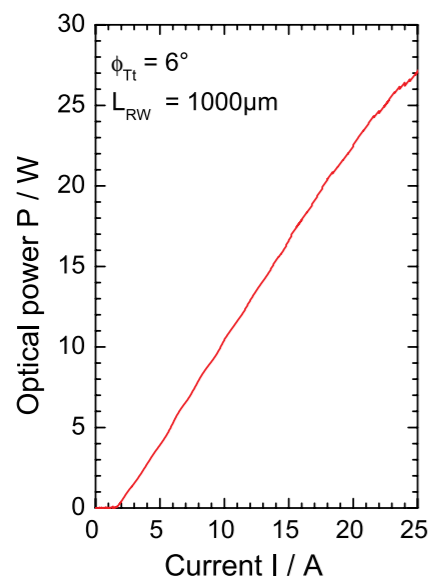


Abb. 1: Leistungs-Strom-Kennlinie für einen 4 mm langen Trapezlaser bei 808 nm bei $T = 25^\circ\text{C}$ im Impulsbetrieb ($\tau = 100$ ns; $f = 1$ kHz).
Fig. 1: Pulsed power-current characteristic of 4 mm long tapered laser emitting at 808 nm ($\tau = 100$ ns; $f = 1$ kHz). Heat sink temperature is 25°C .

good beam quality. In order to meet these requirements, within the EU project WWW.BRIGHTER.EU tailored 808 nm tapered lasers based on a laser structure with a vertical divergence of only 18° (FWHM) were developed. The cavity length is 4 mm and the tapered angle 6°.

A typical pulsed power-current characteristic ($\tau \approx 100$ ns, $f = 1$ kHz) is depicted in Fig. 1. The threshold current is 1.8 A and the slope efficiency as high as 1.2 W/A. At a current of 25 A, an output power of 27 W was reached. This is the highest power obtained with a 808 nm tapered laser until now.

The lateral beam quality of the laser is also excellent. As Fig. 2 shows, even at a power of 9 W more than 65% of the power is emitted from the central lobe.

A wavelength stabilization of a tapered laser can be achieved by integrating a Bragg grating into the cavity. Depending on the number and positions of the gratings in the cavity, different configurations are possible. If the RW section works as an autonomous distributed-feedback (DFB) or distributed Bragg reflector (DBR) laser,

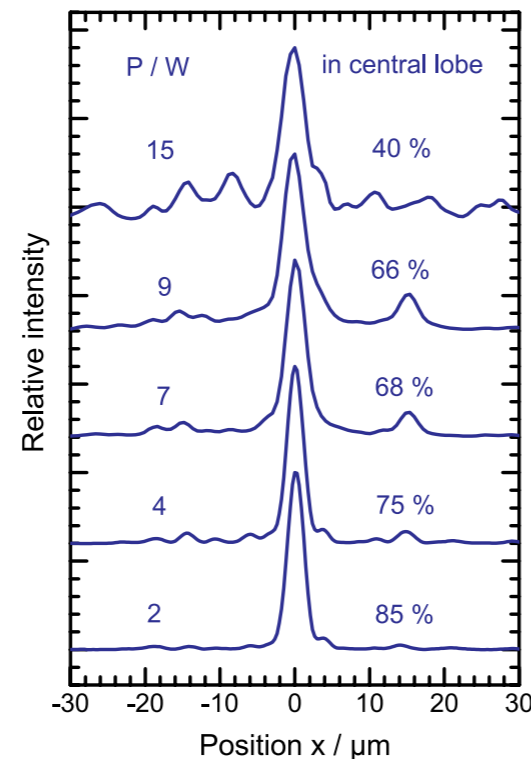


Abb. 2: Strahlteile für den Diodenlaser aus Abb. 1 bei $T = 25^\circ\text{C}$ im Impulsbetrieb.
Fig. 2: Pulsed intensity profiles in the beam waist of the diode laser from Fig. 1. Heat sink temperature is 25°C .

Lateral besitzt der Laser ebenfalls eine sehr gute Strahlqualität. Wie die Abbildung 2 zeigt, werden selbst bei einer Leistung von 9 W noch immer 65% der Leistung aus der zentralen Strahlkeule emittiert.

Eine Wellenlängenstabilisierung von Trapezlasern kann man durch Integration eines Bragg-Gitters in den Resonator erreichen, wobei verschiedene Varianten möglich sind. Wird die RW-Sektion als autonom arbeitender „Distributed-Feedback-“ (DFB) oder „Distributed-Bragg-Reflector-“ (DBR) Laser ausgeführt, so arbeitet die Trapezsektion als Verstärker, d.h. das gesamte Bauelement stellt einen monolithisch integrierten sogenannten „Master-Oscillator Power-Amplifier“ (MOPA) dar.

Am FBH wurden DBR-Trapez-MOPAs mit einer Gesamtlänge von 8 mm entwickelt. Die Trapezsektion ist dabei 4 mm lang und hat einen Öffnungswinkel von 6°. Die RW-DBR-Sektion hat zur Trapezsektion ein 65 μm langes Auskoppelgitter. Das Gitter auf der Rückseite ist 500 μm lang. Die Bragg-Gitter wurden holografisch in Fotolack belichtet und durch nasschemisches Ätzen in das Halbleitermaterial übertragen. Durch einen weiteren Epitaxieschritt entstand die laserfähige Schichtstruktur. Die 8 mm langen Chips wurden auf neu entwickelte Wärmesenken aufgebaut, die es erlauben, sowohl Oszillator und Verstärker getrennt anzusteuern als auch die entstehende Verlustwärme abzuführen (Abb. 3).

Abb. 4 zeigt die Leistungs-Strom-Kennlinie und das optische Spektrum eines bei 976 nm emittierenden DBR-Trapez-MOPAs im Dauerstrich-Betrieb. Auf der x-Achse ist der Strom durch die Trapezsektion aufgetragen.

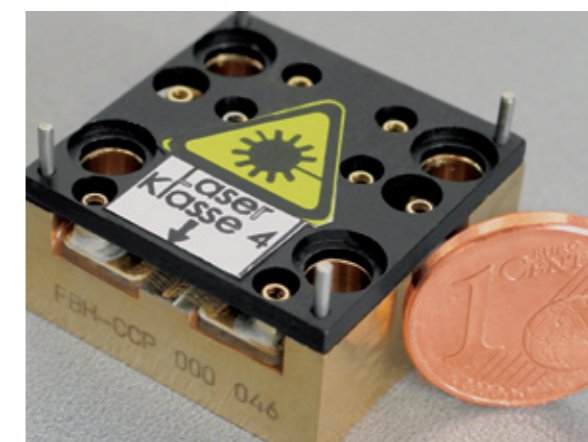


Abb. 3: DBR-Trapez-MOPA für 10 W optische Leistung auf neu entwickelter Wärmesenke.
Fig. 3: DBR tapered MOPA for 10 W optical power on a newly developed heatsink.

the tapered section acts as an amplifier. In this case, the whole device represents a monolithic integrated master-oscillator power-amplifier (MOPA).

At FBH DBR tapered MOPAs with a total length of 8 mm were developed. The tapered section has a length of 4 mm and a flare angle of 6°. The RW DBR section has a 65 μm long outcoupling grating towards the tapered section and a 500 μm long grating on the rear facet. The Bragg gratings were defined by holographic photolithography and transferred into the semiconductor surface by wet-chemical etching. The laser structure was completed by a second growth step. The 8 mm long lasers were mounted on specially developed heat sinks (see Fig. 3), which allow a separate control of oscillator and amplifier currents as well as an efficient removal of the accrued thermal power.

Fig. 4 shows the power-current characteristics and the optical spectrum of a DBR tapered MOPA emitting near 976 nm. The abscissa is the input current I_{RW} to the RW DBR laser. For currents $I_{RW} > 200$ mA the characteristics are almost independent of I_{RW} and nearly linear. At a current of 13.7 A to the tapered section an output power of 11 W is reached. The optical spectrum,

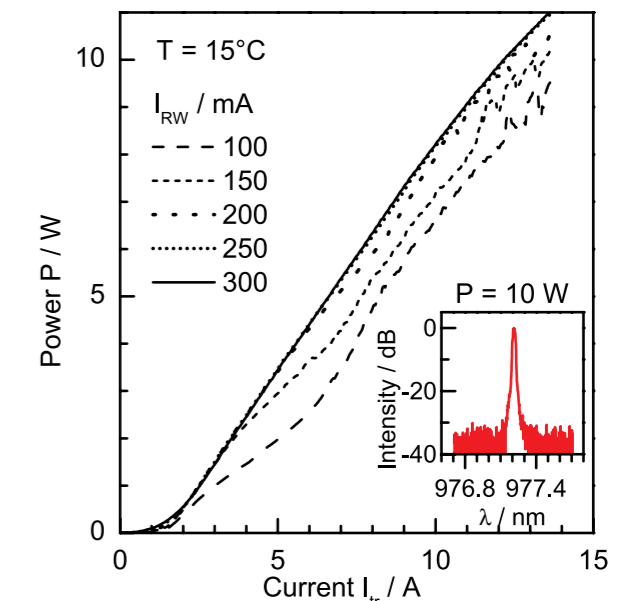


Abb. 4: Leistungs-Strom-Kennlinien bei 976 nm DBR-Trapez-MOPAs im Dauerstrichbetrieb bei 15°C Wärmesenkentemperatur. Optisches Spektrum bei einer Ausgangsleistung von 10 W.
Fig. 4: Continuous wave power-current characteristics of DBR tapered MOPA emitting near 976 nm. Inset: Optical spectrum at a power of 10 W. Heat sink temperature is 15°C .

Scharparameter ist der Strom IRW durch RW-DBR-Laser. Für Ströme IRW > 200 mA sind die Kennlinien nur noch wenig von IRW abhängig und nahezu linear. Bei einem Strom von 13,7 A durch die Trapezsektion wird eine Ausgangsleistung von 11 W erreicht. Das bei einer Ausgangsleistung von 10W und einem Strom von IRW = 200 mA aufgenommene optische Spektrum zeigt das Lasern einer einzigen Mode mit einer Seitenmodenunterdrückung von mehr als 30 dB, begrenzt durch den verwendeten optischen Spektrenanalysator. Die Messungen zur Strahlqualität zeigen, das auch bei 8 W noch mehr als 70% der Laserstrahlung beugungsbegrenzt emittiert wird. Damit konnte erstmals ein monolithischer DBR-Trapez-MOPA mit Ausgangsleistungen größer 5 W demonstriert werden.

recorded at an power of 10 W with IRW = 200 mA, shows lasing of a single longitudinal mode with a side mode suppression of more than 30 dB, limited by the optical spectrum analyzer used. Measurements of the beam characteristics reveal, that even at 8 W more than 70% of the power is diffraction limited emitted. Hence, for the first time a monolithic DBR tapered MOPA with output powers greater than 5 W was demonstrated.

F. Dittmar, B. Sumpf, J. Fricke, G. Erbert, G. Tränkle: „High-power 808 nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of M2 = 1.9 at P = 4.4 W,“ IEEE Photonics Technology Letters 18, S. 601 - 603 (2006)

F. Dittmar, B. Sumpf, J. Fricke, G. Erbert, G. Tränkle: „High-power 808 nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of M2 = 1.9 at P = 4.4 W,“ IEEE Photonics Technology Letters 18, pp. 601 - 603 (2006)

O. B. Jensen, A. Klehr, F. Dittmar, B. Sumpf, G. Erbert, P. E. Andersen, P. M. Petersen: „Pulsed tapered diode lasers,“ Photonics West 2007, High-Power Diode Laser Technology and Applications V, Poster 6456-44, San Jose, 20. - 25. January 2007

O. B. Jensen, A. Klehr, F. Dittmar, B. Sumpf, G. Erbert, P. E. Andersen, P. M. Petersen: „Pulsed tapered diode lasers,“ Photonics West 2007, High-Power Diode Laser Technology and Applications V, Poster 6456-44, San Jose, 20. - 25. January 2007

H. Wenzel, K. Paschke, O. Brox, F. Bugge, J. Fricke, A. Ginolas, A. Knauer, P. Ressel, G. Erbert: „10-W Continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier,“ Electronics Letters, 2007.

H. Wenzel, K. Paschke, O. Brox, F. Bugge, J. Fricke, A. Ginolas, A. Knauer, P. Ressel, G. Erbert: „10-W Continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier,“ Electronics Letters, 2007.

Veröffentlichungen

B. Sumpf, R. Hülsewede, G. Erbert, C. Dzionk, J. Fricke, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Tränkle: „High-brightness 735-nm tapered diode lasers,“ Electronics Letters 38, S. 183 - 184 (2002)

Publications

B. Sumpf, R. Hülsewede, G. Erbert, C. Dzionk, J. Fricke, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Tränkle: „High-brightness 735-nm tapered diode lasers,“ Electronics Letters 38, pp. 183 - 184 (2002)

B. Sumpf, R. Hülsewede, G. Erbert, C. Dzionk, J. Fricke, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Tränkle: „High Brightness 735 nm Tapered Lasers - Optimisation of the Laser Geometry,“ Optical and Quantum Electronics 35, S. 521 - 532 (2003)

B. Sumpf, R. Hülsewede, G. Erbert, C. Dzionk, J. Fricke, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, H. Wenzel, G. Tränkle: „High Brightness 735 nm Tapered Lasers - Optimisation of the Laser Geometry,“ Optical and Quantum Electronics 35, pp. 521 - 532 (2003)

G. Erbert, J. Fricke, R. Hülsewede, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, B. Sumpf, H. Wenzel, G. Tränkle: „3 W - high brightness tapered diode lasers at 735 nm based on tensile strained GaAsP-QWs,“ Proceedings SPIE 4995, S. 29 - 38 (2003)

G. Erbert, J. Fricke, R. Hülsewede, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian, B. Sumpf, H. Wenzel, G. Tränkle: „3 W - high brightness tapered diode lasers at 735 nm based on tensile strained GaAsP-QWs,“ Proceedings SPIE 4995, pp. 29 - 38 (2003)

H. Wenzel, B. Sumpf, G. Erbert: „High-brightness diode lasers,“ Comptes Rendus Physique 4, 649-661 (2003)
B. Sumpf, G. Beister, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, G. Tränkle: „Reliable 1 W CW Operation of High-Brightness Tapered Diode Lasers at 735 nm,“ IEEE Photonics Technology Letters 16, S. 984 - 986 (2004)

H. Wenzel, B. Sumpf, G. Erbert: „High-brightness diode lasers,“ Comptes Rendus Physique 4, 649-661 (2003)
B. Sumpf, G. Beister, G. Erbert, J. Fricke, A. Knauer, P. Ressel, G. Tränkle: „Reliable 1 W CW Operation of High-Brightness Tapered Diode Lasers at 735 nm,“ IEEE Photonics Technology Letters 16, pp. 984 - 986 (2004)

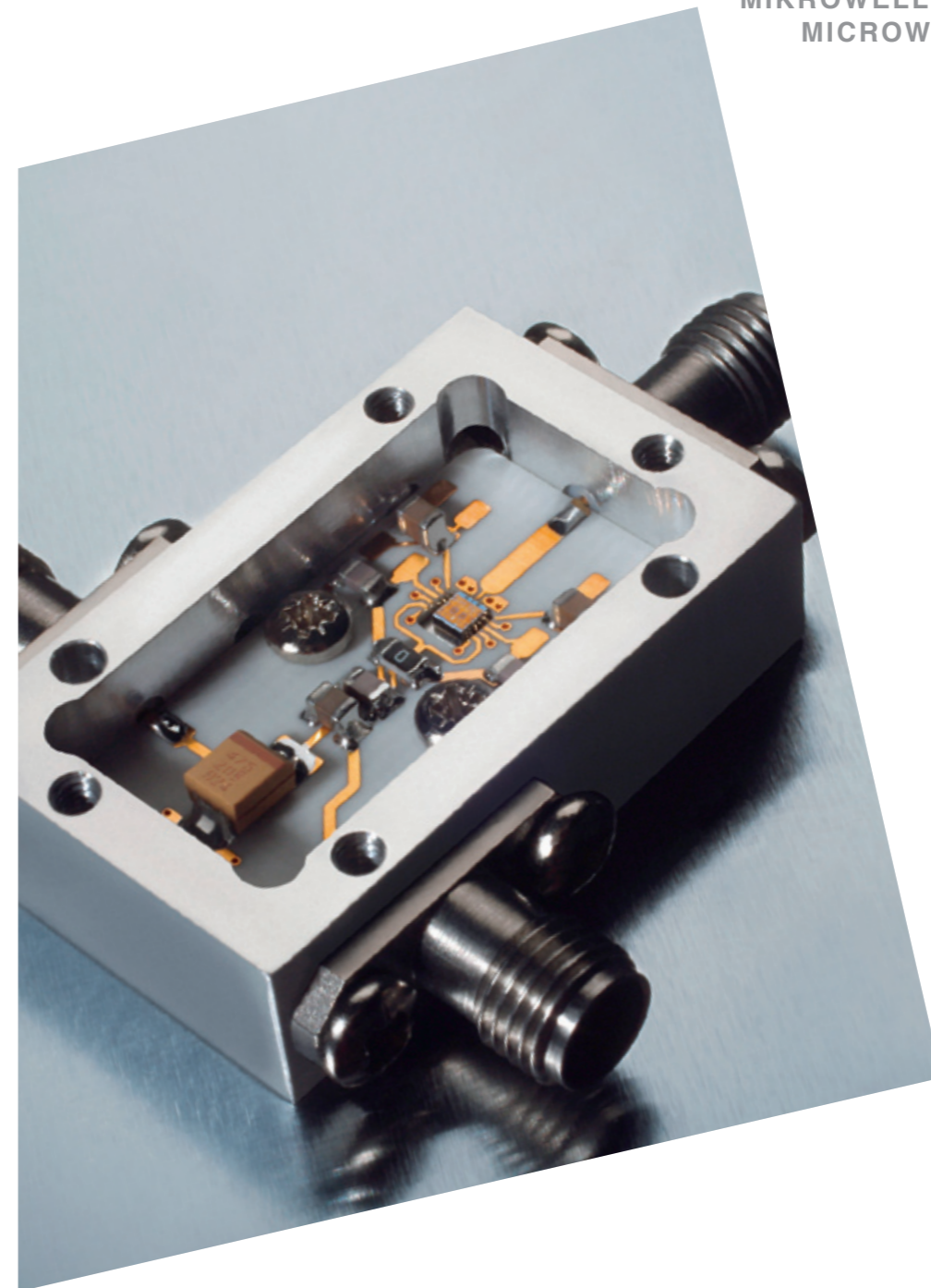
K. Paschke, B. Sumpf, F. Dittmar, G. Erbert, R. Staske, H. Wenzel, G. Tränkle: „Nearly-diffraction limited 980 nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W,“ IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 11, S. 1223 - 1227 (2005)

K. Paschke, B. Sumpf, F. Dittmar, G. Erbert, R. Staske, H. Wenzel, G. Tränkle: „Nearly-diffraction limited 980 nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W,“ IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 11, pp. 1223 - 1227 (2005)

GESCHÄFTSFELDER & FORSCHUNG

■ BUSINESS SEGMENTS & RESEARCH AREAS

MIKROWELLENKOMponentEN & -SYSTEME
MICROWAVE COMPONENTS & SYSTEMS



■ Einführung Geschäftsfeld
Mikrowellenkomponenten & -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 „Leistungsbauelemente für den Frequenzbereich 2 bis 10 GHz“ und „Millimeterwellen-ICs im Frequenzbereich 10 GHz bis 80 GHz“, speziell Low-Power-Frontends.

Die am FBH entwickelten Bauelemente sind Schlüsselkomponenten für die drahtlose Kommunikation (Basis-Stationen für die Mobilkommunikation, Breitband-Richtfunk) und die Sensorik (z.B. Radarsensoren im Automobil). Neu 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:

- 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
- Low-Power 24 GHz-Frontends für hochminiaturisierte Sensornetz-Knoten, realisiert mittels innovativer 3D-Aufbautechnik und mit integrierter Antenne
- Integrierte Mikrowellen-Quellen zur Plasma-Erzeugung im 2 GHz-Band

Die zugehörigen GaAs- und GaN-Prozesse werden von den Technologie-Abteilungen des FBH 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 Werkzeuge und Methoden zur 3D elektromagnetischen Simulation sind sowohl Gegenstand der Forschung als auch Werkzeug zur Entwicklung der Komponenten. Eine spezialisierte Messtechnik ermöglicht die Charakterisierung der Bauelemente bis zu Frequenzen von 110 GHz.

■ Introduction Microwave
Components & 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.

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). New in the portfolio is the field of microwave plasma sources, integrating power electronics together with excitation structures for plasma generation.

In more detail, the main topics of research include:

- GaN high-power transistors (HEMTs) and MMICs for frequencies from 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
- Low-power 24 GHz front-ends for highly miniaturized sensors, applying a novel 3D packaging approach with integrated antenna
- Integrated microwave sources for plasma generation (2 GHz range)

The relevant GaAs and GaN processes are developed and maintained by the FBH technology departments. A clean-room laboratory with industry-level equipment offers the capabilities required to fabricate devices with state-of-the-art performance. The microwave department is a center of competence for microwave and mm-wave IC design and the respective packaging. Advanced methods for 3D electromagnetic simulation as well as transistor modeling and circuit design are subject of research as well as routinely available as tools for component development. Dedicated measurement equipment allows characterization up to frequencies of 110 GHz.

■ GaN-Hochleistungstransistoren
und ICs für effiziente Mikrowellen-
Leistungserzeugung

Das FBH arbeitet intensiv an der Entwicklung von GaN-basierten Mikrowellentransistoren für Frequenzen bis 10 GHz. Diese Bauteile eignen sich in idealer Weise für Mobilfunk-Basisstationen der nächsten Generation und als Leistungsbauelemente für weltraumgestützte Mikrowellensysteme. Die Schlüsselfaktoren für diese Entwicklungen liegen in den hervorragenden Materialeigenschaften von GaN/AlGaIn-Schichten auf SiC-Substraten wie der großen Bandlücke, der hohen Elektronenkonzentration im 2. DEG, der hohen Sättigungsgeschwindigkeit der Elektronen und der hohen Wärmeleitfähigkeit des SiC-Substrats. Sie ermöglichen eine effiziente Leistungserzeugung im Mikrowellenbereich bei hohen Betriebsspannungen. Die am FBH durchgeführten Arbeiten decken die komplette Wertschöpfungskette ab, vom physikalisch orientierten Bauelementdesign über das Mikrowellen-Schaltungsdesign, die Epitaxie und die Prozessierung bis hin zur thermisch optimierten Aufbautechnik. Aufgebaute Demonstratorchips runden das Portfolio des FBH bei GaN-Bauelementen ab.

Im Vordergrund der Forschungsarbeiten zu GaN-HFETs stehen:¹

- Diskrete Hochleistungstransistoren mit Ausgangsleistungen von bis zu 100 W für den Frequenzbereich bis 3 GHz (L- und S-Band), für Anwendungen in Mobilfunk-Basisstationen (L-Band) oder Radaranlagen (S-Band)
- Leistungsbauelemente für Weltraumanwendungen: Die Entwicklungen konzentrieren sich auf den Bereich um 8 GHz (X-Band). Die HF-Leistungstransistoren und MMICs erreichen Ausgangsleistungen von 10 W bzw. 16 W
- Als neuer Fokus wurde mit der Entwicklung von effizienten GaN-Leistungs-Schaltransistoren für hohe Leistungspegel begonnen
- Zuverlässigkeitstests und -Analysen von GaN-HFETs

Im Jahr 2005 wurde eine Multiwafer Epitaxieanlage (11x2") für GaN/AlGaIn-Bauelemente in Betrieb genommen und Ende 2006 auf 3"-fähige Suszeptoren umgerüstet (8x3"), um dem weltweiten Fortschritt bei der Entwicklung von qualitativ hochwertigen SiC-Substraten Rechnung zu tragen. Die Eigenschaften der am FBH hergestellten Epitaxieschichten für GaN HFETs vergleichen sich mit den weltweit üblichen Resultaten, die erreichten Schichthomogenitäten setzen neue Maßstäbe (Bild 1). Standard-Testtransistoren erreichen

■ GaN High-Power Transistors and
ICs for Efficient Microwave Power
Generation

GaN-based microwave power transistors represent one of the key topics in the FBH portfolio, the activities focus on the frequency range up to 10 GHz. GaN devices are ideally suited for next-generation base stations for mobile communications as well as for space-borne microwave applications. The outstanding potential of these components is related to the excellent physical properties of the GaN/AlGaIn material system such as large band gap, high sheet electron density combined with high saturation velocity and high thermal conductivity of the SiC substrate material. This facilitates efficient microwave power generation at high bias-voltage levels. The work performed at FBH addresses the complete value-added chain for GaN-HFET devices from physical and microwave device design, epitaxy, and processing to thermally optimized packaging.

The main research topics in the field of GaN power transistors are:¹

- Discrete high-power transistors enabling output power levels of 100 W at a frequency of up to 3 GHz (L- and S-band) for base stations in mobile communications (L-band) and radar applications (S-band)
- Space-borne high-power devices: These developments are focused at X-band applications. Discrete rf-power transistors and power MMICs have reached power levels of 10 W and 16 W respectively
- As a new topic, the development of GaN-based switching transistors for high power levels has recently started
- Reliability tests and associated analytics

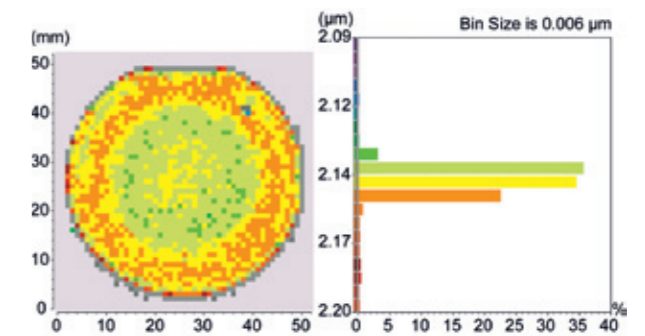


Bild 1: Schichtdickenverteilung von GaN-Schichten auf SiC. Über 2" konnte eine Homogenität von besser als 0,3 % erreicht werden.
Fig. 1: GaN epitaxial-layer thickness distribution of GaN layers on SiC. A homogeneity of better than 0.3% is obtained for 2" wafers.

Leistungsdichten von 6 W/mm bei 28 V Drainspannung und Durchbruchspannungen über 110 V.

Das FBH verfügt über einen stabilen Prozess zur Herstellung von diskreten GaN-Bauelementen und GaN-MMICs. Eine kontinuierliche Optimierungsstrategie zielt auf qualitativ hochwertige, zuverlässige und reproduzierbare Bauelemente.

Besondere Fortschritte wurden unter anderem mit der Einführung der Feldplattentechnologie und, als deren Weiterentwicklung, mit der Feedplate-Technologie erreicht. Es konnte gezeigt werden, dass GaN-Transistoren mit Feldplattendesigns weniger Leistungsdispersion aufweisen und damit noch größere Leistungsdichten erreichen. Die derzeit eingesetzten Feldplatten sind entsprechend Bild 2 a) unmittelbar über den Gate-Steuerelektroden durch eine SiNx-Schicht getrennt, jedoch an den Gatepads mit dem Gatepotential verbunden. Derartig dimensionierte Feldplatten bauen elektrische Feldspitzen an der drainseitigen Kante des Gates ab und erhöhen beispielsweise bei 2 GHz und einer Drainspannung von 28 V die Leistungsdichte von ca. 7 W/mm auf mehr als 11 W/mm.

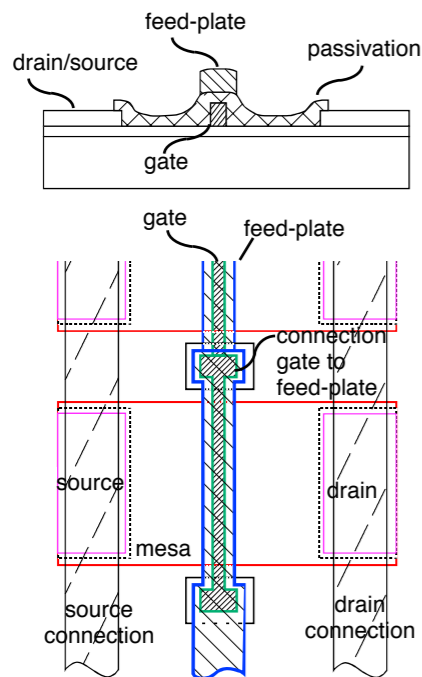


Bild 2 b: Ansicht eines Powerbar-Transistors mit Feed-Plate. Die Verbindung der Feed-Plate zum Gate erfolgt zwischen zwei Transistorzellen.
Fig. 2 b: Power-bar transistor with feed-plate: The interconnect between feed-plate and gate potential is accomplished between the sub-cells.

In 2005 a multiwafer MOVPE reactor (11x24") for GaN/AlGaIn devices was put into operation, the reactor was upgraded to an 8x3" configuration by the end of 2006 in order to cope with the worldwide progress in high-quality SiC substrate fabrication. The properties of epitaxial layers for GaN HFETs compare well to international results, the homogeneity levels obtained are excellent (see Fig. 1). A power density of 6 W/mm at 28 V drain bias and breakdown voltages exceeding 110 V are achieved for standard test transistor designs.

FBH is running a stable process for discrete GaN-based HFETs as well as for GaN-MMICs. A continuous quality improvement strategy targets towards reliable and reproducible high quality devices.

Amongst others, significant progress has been obtained by introducing field plates and, as a further development, the feed-plate technology. Field-plated GaN transistors show less power dispersion and thus enable much higher power density levels. Currently the field plates are positioned directly above the gate with an overhang towards the drain side, separated by a SiNx layer and connected to the gate potential in the gate pad region. The field plates effectively reduce field spikes at the drain side edge of the gate and, for example, increase power density level at 2 GHz and 60 V drain bias from typically 7 W/mm to more than 11 W/mm.

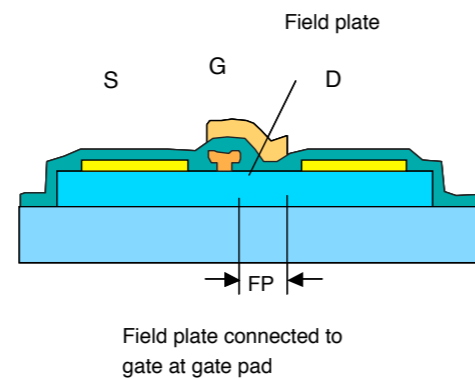


Bild 2 a: Schematische Darstellung des Feldplatten-Designs.
Fig. 2 a: Schematics of field-plate design.

Hochleistungs-Mikrowellentransistoren bestehen aus einer Vielzahl von parallel geschalteten Transistorfingern einer bestimmten Gateweite. Die maximale pro Transistorfinger mögliche Gateweite hängt unter anderem von den Verlusten auf dem Gate ab und liegt bei der am FBH eingesetzten Gatedechnologie für 2 GHz-Anwendungen bei etwa 250 µm. Dies bedeutet, dass die für hohe Leistungen notwendigen großen Gesamt-Gateweiten (40 mm und mehr) nur mit sehr breiten Transistorgeometrien (lange, schmale Chips) realisierbar sind. Dadurch wird die Aufbautechnik problematisch, da es immer schwerer wird, alle Subzellen miteinander zu verbinden, ohne die Stabilitätskriterien der Anordnung zu verletzen - die Powerbars werden instabil und schwingen. Deutlich längere Einzelfinger der Subzellen könnten dieses Problem drastisch reduzieren, jedoch dominieren dann die Gateverluste und verhindern eine Skalierung der Ausgangsleistung mit der Gateweite.

Die Einführung einer neuen Gate-Technologie überwindet diese Begrenzung. Das neue, als „Feed-plate“ bezeichnete Design segmentiert die Gesamtfingerweite in Abschnitte von 125 µm. Über dem eigentlichen Gate verläuft, durch eine Passivierungsschicht getrennt, die Gate-Feedline. Sie kontaktiert nach jedem 125 µm Segment die darunterliegende Gate-Elektrode und stellt daher eine verlustarme Parallellleitung zum Gate dar. Weist die Feedline einen Überlapp in Richtung Drain auf, so fungiert sie gleichzeitig als Feldplatte. Auf diese Weise gelingt es, die Vorteile von Feedline- und Feldplattentechnik zu vereinen und die ohmschen Verluste des Gates deutlich zu reduzieren - Powerbars mit längeren Einzelfingern werden möglich.

Das Feed-plate Konzept wurde erfolgreich zur Herstellung von Powerbars für breitbandige, im Bereich von 400 MHz bis 2 GHz arbeitende Basisstations-Verstärkerdemonstratoren der Firma Lucent (jetzt Alcatel-Lucent) angewendet. Zur Realisierung eines Single-chip-100 W-Verstärkers wurde ein Powerbar-Design mit insgesamt 40 mm Gesamt-Gateweite gewählt, bestehend aus 10 Subzellen zu je 8 Transistoren mit 500 µm Gateweite (10x8x500 µm).

Die wichtigste technische Fragestellung war die elektrische Stabilisierung des Powerbars in der Gehäuseumgebung. Es war zu klären, wie die Transistoren in das Gehäuse eingebaut und mit Bonddrähten kontaktiert werden können, um parasitäre Schwingungen zu vermeiden. Wegen der sehr hohen Verstärkung und

High-power microwave transistors consist of a multitude of individual transistor fingers connected in parallel. The maximum finger width per individual transistor cell mainly depends on the gate losses. Thus, for the standard FBH GaN technology the finger width is limited to 250 µm for 2 GHz applications. This means that very high power levels (equivalent to more than 40 mm gate width) require extremely wide chip architectures. This poses problems in device packaging (wide and rather small chip dimensions) since it will be increasingly difficult to combine the sub-cells without compromising power bar stability. Much wider individual transistor cells could significantly leverage the problem – however, in this case gate losses would dominate and prevent scaling of output power with finger width.

The introduction of a new gate technology overcomes these difficulties. The new design, referred to as „feed-plate“, segments the finger width of an individual transistor cell into multiples of 125 µm (see Fig. 2b). The feed-plate is positioned above the gate, and is separated from the gate by a passivation layer. After each 125 µm segment the feed-plate is connected to the gate electrode underneath thus providing a low loss feed-line to the gate segments. If the feed-plate has a certain overlap towards the drain side, it additionally acts as a field-plate thus combining the benefits of field-plate and gate feed-line. This significantly reduces ohmic losses of the gates and enables power bars with longer individual finger widths.

The feed-plate concept has been successfully applied for the fabrication of power bars for wide-band base-station amplifier demonstrators for Lucent (now Lucent-Alcatel) operating between 400 MHz and 2 GHz. For the realization of a 100 W single-chip amplifier a power bar design with of a total gate width of 40 mm consisting of 10 sub-cells with 8 transistors of 500 µm gate width (10x8x500 µm) has been chosen.

One of the most important technical issues is to keep the packaged power bars electrically stable. A method had to be developed how to mount power bars in standard microwave packages and to connect them by wire bonds without compromising stability. Because of their high gain and the lack of pre-matching (due to band width requirements) such power bars are generally prone to oscillations. Microwave simulations of packaged power bars assisted in developing an appropriate solution of the oscillation problem by incorporating low-loss drain interconnects. This method was then applied to

der fehlenden Voranpassung (wegen der erforderlichen Breitbandigkeit) sind derartige GaN-Powerbars generell schwingungsanfällig. Mikrowellen-Simulationen von aufgebauten Powerbars führten zu der Erkenntnis, dass u.a. eine induktivitätsarme Verbindung der Drainanschlüsse der einzelnen Subzellen das Schwingungsproblem lösen kann. Die Methode wurde umgesetzt, indem auf den bereits ins Gehäuse eingebauten Transistoren eine on-Chip Drainverbindung durch Drahtbonden entsprechend Bild 3b) hergestellt wurde. Auf diese Weise gelang es, parasitäre Schwingungen in allen Frequenzbereichen zu vermeiden und eine Leistung von 100 W Dauerstrichbetrieb mit single-Chip-Mikrowellentransistoren zu erreichen. Bild 3 c) fasst die entsprechenden Loadpull-Messergebnisse zusammen.² Sie stellen derzeit einen europäischen Rekordwert für single-Chip-GaN-Transistoren im Dauerstrichbetrieb (CW) dar.

mounted power bars realizing the drain interconnects by on-chip wire bonding (see Fig. 3b). Thus power bar oscillations could be avoided leading to stable 100 W single-chip microwave transistors operating at 2 GHz. Fig. 3c) summarizes the load-pull results.² The 100 W results attracted considerable international attention. Currently FBH holds the European record for single-chip GaN-transistors operated in continuous wave (cw) mode.

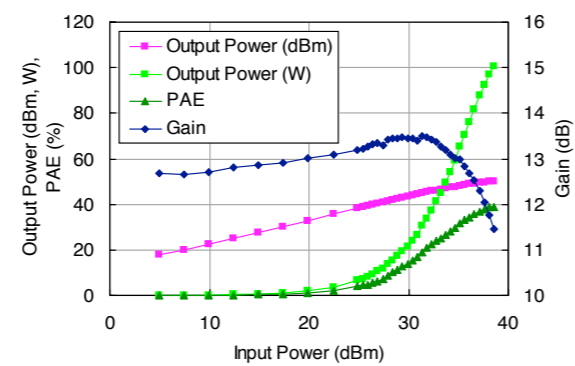


Bild 3 c: Load-Pull Messungen bei 27 V Betriebsspannung.
Fig. 3 c: Load-pull characterization at 27 V drain bias.

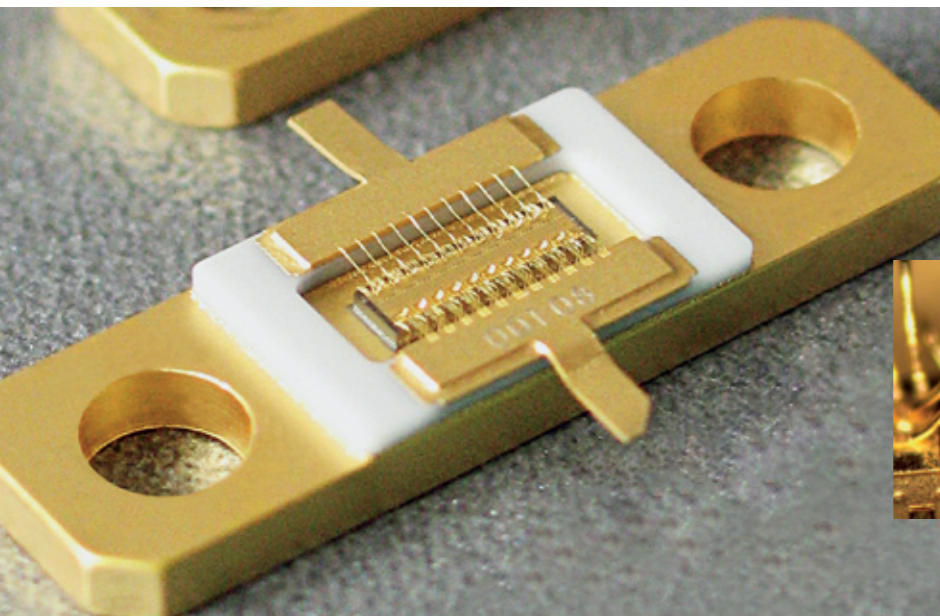


Bild 3 a: Montierte Powerbars der Größe 11x8x500 μm.
Fig. 3 a: Mounted power bars (11x8x500 μm topology).

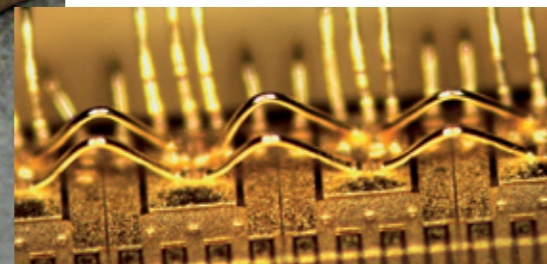


Bild 3 b: Detail zur on-Chip Drainverbindung.
Fig. 3 b: Details of on-chip drain interconnect.

Im Rahmen eines von der ESA geförderten Projekts konzentrierte sich die Entwicklung von Hochleistungstransistoren für den X-Band Bereich auf gehäuste diskrete Transistoren. Durch eine an die entsprechende Gehäuseteknologie angepasste Voranpassung (pre-matching) der Transistoren konnte bei einer Frequenz von 8 GHz an gehäusten Transistoren eine Ausgangsleistung von 10 W erreicht werden. Bild 4a) zeigt den Aufbau dieser Transistoren im Gehäuse. Die Transistoren wurden vom Projektpartner TESAT-Spacecom aufgebaut. Das 10 W X-Band-Modul besteht aus zwei Transistoren auf einem Chip. Diese enthalten monolithisch integrierte Strukturen für das Pre-matching und die Odd-Mode-Schwingungsunterdrückung. Das Gehäuse selbst eignet sich für die später vorgesehene hermetisch dichte Einkapselung der Transistoren. Die im Gehäuse erreichte Ausgangsleistung beträgt 10 W bei einem Wirkungsgrad von 35% und einer linearen Verstärkung von 12,5 dB.

In the frame of an ESA-funded project, X-band high-power discrete transistors were developed. Due to an on-chip pre-matching optimized for the given package, an output power of 10 W for packaged devices, a PAE of 35%, and a linear gain of 12.5 dB was obtained at 8 GHz. Fig. 4a) depicts the power device mounted in a package. Packaging was performed by the project partner TESAT Spacecom. The 10 W X-band module consists of two parallel power transistors containing integrated passive structures for pre-matching and suppression of odd-mode oscillations. The package itself provides the possibility for a hermetic encapsulation of the devices in order to meet space requirements.

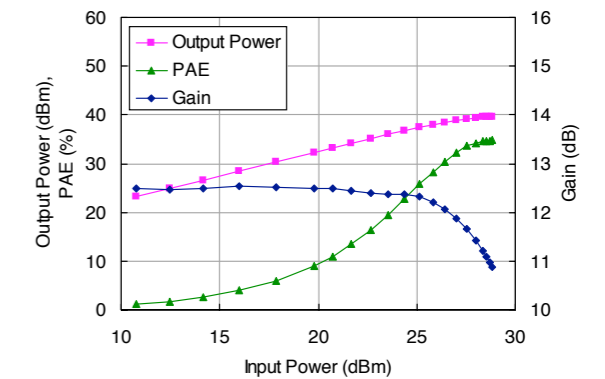


Bild 4 b: Load-Pull-Daten der gehäusten Transistoren bei 8 GHz und 28 V Drainspannung.
Fig. 4 b: Load-pull data of packaged devices at 8 GHz and 28 V drain bias.

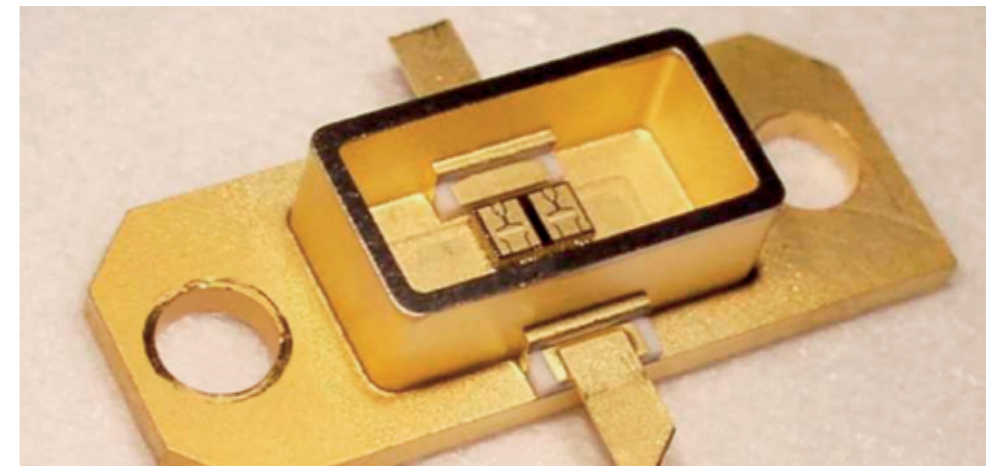


Bild 4 a: Vorangepasste Mikrowellentransistoren in einem hermetisch verschweißbaren Mikrowellengehäuse.
Fig. 4 a: Pre-matched dual transistors mounted in package suitable for hermetic sealing.

Neben diskreten GaN-Bauelementen entwickelt und realisiert das FBH auch monolithisch integrierte Leistungsverstärker für das X-Band (8-12 GHz). Bei diesen hohen Frequenzen verursachen die Gehäuseübergänge bei diskreten Transistoren merkliche parasitäre Effekte, weshalb die monolithische Realisierung als MMIC hier Vorteile verspricht.

Für die Entwicklung dieser Schaltungen wird am FBH das gesamte Spektrum an Design-Werkzeugen von der elektromagnetischen Modellierung passiver Strukturen bis hin zur Großsignalbeschreibung der Transistoren eingesetzt. Konkretes Beispiel ist ein zweistufiger Leistungsverstärker für 8 GHz, der eine Dauerstrichleistung von 16 W bei einer linearen Verstärkung von 18 dB liefert. Der Chip ist nur 2,2 x 3,3 mm² groß, ein Bestwert in dieser Leistungsklasse.³ Die koplanar aufgebaute Schaltung erreicht eine PAE von 30 %. Bild 5 zeigt ein Chip-Foto sowie die gemessenen Leistungsdaten.

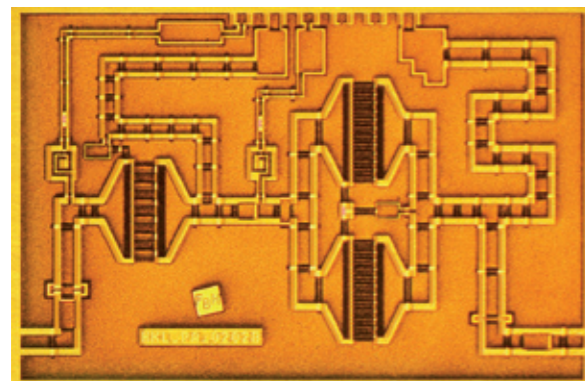


Bild 5 a: Chip-Foto des 8 GHz MMIC-Leistungsverstärkers mit 16 W Ausgangsleistung.
Fig. 5 a: Chip photo of the 8 GHz, 16 W MMIC power amplifier.

Flip-chip-montierte GaInP/GaAs Hochvolt-Leistungs-HBTs

Die gute Eignung der GaInP/GaAs Heterojunction-Bipolar-Transistoren (HBT) für Anwendungen in der Mobilkommunikation und für drahtlose Netzwerktechniken wurde vielfach demonstriert. HBTs werden mittlerweile bevorzugt als Leistungsverstärker in mobilen Endgeräten eingesetzt. Die hohe Effizienz der HBT-Verstärker kann auch im Bereich der Basisstationen genutzt werden. Hierfür ist jedoch eine relativ hohe Betriebs-

Besides discrete GaN devices, FBH also designs and realizes MMIC power amplifiers for X-Band (8-12 GHz) operation. At these frequencies the packaging of single devices to be used in hybrid circuits degrades performance because of parasitics. Therefore, on-chip realization of the circuit as an MMIC becomes favorable.

For the development of these circuits the whole spectrum of design tools from electromagnetic simulation of passive circuit elements to large-signal device modeling is applied at FBH. As a showcase a two-stage power amplifier operating at 8 GHz with a continuous-wave output power of 16 W and a linear gain of 18 dB has been designed and fabricated, the chip size being only 2.2 x 3.3 mm², a best-in-class value for MMICs in that power range.³ The coplanar circuit achieves a power-added efficiency of 30 %. Fig. 5 presents the chip photograph and the power measurement data.

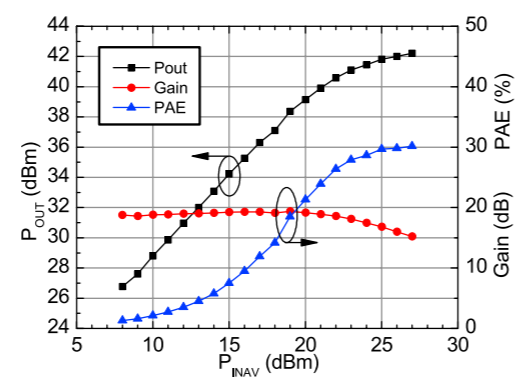


Bild 5 b: Leistungsdaten des zweistufigen Verstärkers PA0202B, bei 8 GHz und $V_D = 28$ V.
Fig. 5 b: Power performance of the two-stage amplifier PA0202B, at 8 GHz and $V_D = 28$ V.

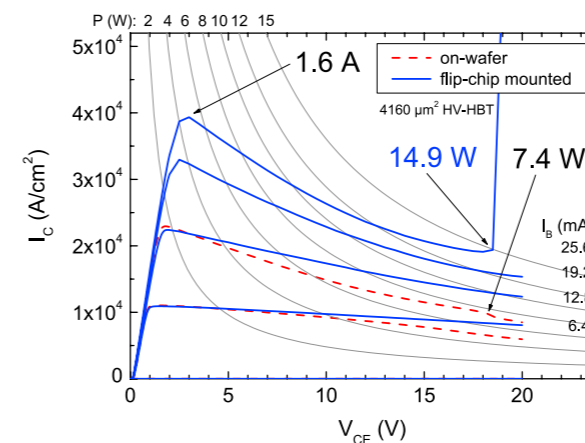
Flip-Chip-Mounted High-Voltage GaInP/GaAs Power-HBTs

GaAs-based heterojunction bipolar transistors (HBTs) have proven their excellent performance as devices in power amplifiers (PAs) for the wireless market. Despite being challenged by SiGe HBTs, they have been dominating the power stages in mobile phones for years, which is due to their unique combination of capabilities in terms of power, efficiency, and linearity. This potential could be beneficial also for base-station PAs. Such ap-

spannung von ca. 28 V erforderlich, die herkömmliche HBT-Typen nicht aufweisen. Sie können nur bis ca. 10 V betrieben werden.

Am FBH wurde deshalb eine HBT-Variante entwickelt, die bei hohen Speisespannungen bis 28 V betrieben werden kann (High-Voltage-HBT: HV-HBT). Das Ziel war die Herstellung einer Leistungszelle, die eine hohe Ausgangsleistung von mindestens 10 W bei 2 GHz mit guter Effizienz (> 50%) liefert. Diese „Grundzelle“ kann dann zu Verstärkern im Bereich von einigen 10 bis 100 W kombiniert werden. Wegen der im Vergleich zu Si-LDMOS-Transistoren größeren Bandbreite eignen sich diese Transistoren auch für Multi-Band-Anwendungen oder Breitband-Konzepte wie z.B. Schaltverstärkerlösungen.

Die Erzeugung von Leistungen im Bereich von einigen Watt setzt eine effiziente Abführung der Verlustwärme voraus. Bild 1 verdeutlicht diese Problematik. In dem thermisch ungünstigen Fall der Messung im Waferverbund (on-wafer) zeigen die Kennlinien bereits bei einer Leistung um 7 W den HBT-typischen Einbruch in der Stromverstärkung, der auf starke Erwärmung und die zunehmende Konzentration des Stromes auf die heißesten Bereiche des Bauelements zurückzuführen ist. Diese Stromkonzentration würde bei weiterer Erhöhung des Stroms zur Zerstörung des Bauelements führen. Das Potential der HV-HBT-Leistungszellen ist erst nach der Montage auf eine Wärmesenke sichtbar: jetzt können über 14 W umgesetzt werden.



plications, however, require higher output-power levels as well as higher operation voltages, the latter being in the 28 V range for the classical mobile communications base-stations. Conventional GaAs HBTs can be operated only at voltages up to about 10 V, well below this specification.

In order to meet the 28 V requirements, a special GaAs-HBT version with increased breakdown voltage was developed at FBH, which is referred to as high-voltage HBT (HV-HBT) in the following. The objective of this work was to realize a power-transistor cell capable of delivering 10 W output power at 2 GHz with high efficiency (more than 50%). This unit cell then can be combined to amplifiers in the power range from several 10 W to 100 W. Because such GaAs-HBTs offer larger bandwidth than their Si-LDMOS counterparts, they are suitable also for modern multi-band or broad-band concepts such as switched-mode amplifiers.

Operating at power levels in the 10 W range requires appropriate heat-sinking measures. Fig. 1 illustrates this issue. Plotted are the I-V characteristics for on-wafer measurements, which is non-ideal from the thermal point of view, and after proper mounting on a heat sink. For the on-wafer case, the I-V curves show the HBT-typical decrease in current gain already for dissipated powers around 7 W, which indicates formation of hot spots, i.e., the current is concentrating on the high-temperature areas within the device. In this situation, further increasing the current would eventually destroy the transistor. The true potential of the HV-HBTs becomes obvious only for the mounted case, where the maximum dissipated power increases to above 14 W.

In order to achieve optimum heat-sinking a proprietary mounting scheme was developed, based on the flip-chip approach. The device is flip-chip-soldered on an AlN or diamond carrier using the transistor pads as

Bild 1: Ausgangskennlinien einer HV-HBT-Leistungszelle vor (on-wafer) und nach der Flip-Chip-Montage.
Fig. 1: I-V characteristics of a high-voltage HBT power cell on-wafer and after flip-chip mounting.

Für die thermisch effiziente Montage der HV-HBT-Leistungszellen wurde eine spezielle Abwandlung der Flip-Chip-Montage entwickelt. Hierbei wird das Bauelement auf einen AlN- oder Diamant-Träger gelötet (Bild 2), wobei die elektrisch aktiven Goldschichten des HBT-Aufbaus auch gleichzeitig für die thermische und die mechanische Verbindung genutzt werden. Diese Methode macht die Montage thermisch besonders effektiv und auch kostengünstig. Bild 3 zeigt eine fertig montierte HV-HBT-Leistungszelle im Gehäuse.

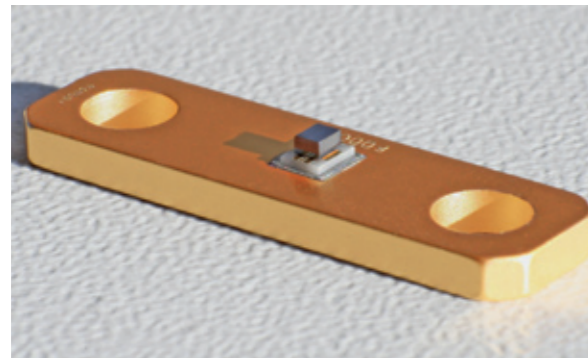


Bild 2: Transistor-Chip mit HBT-Leistungszelle, flip-chip-montiert auf AlN-Träger und Flansch.
Fig. 2: High-voltage power HBT flip-chip mounted on AlN submount and flange.

Die gemessenen Leistungsdaten des Transistors sind in Bild 4 aufgetragen. Die HV-HBTs liefern im A-B-Betrieb Ausgangsleistungen von bis zu 14 W mit einer sehr guten Effizienz von 70 % und guter Verstärkung von 14 dB. Die somit erreichte Leistungsdichte von 360 kW/cm² liegt deutlich höher als bei den konkurrierenden Bauelementen wie LDMOS, und sie ermöglicht folglich eine starke Verringerung der Chipgröße. Im Vergleich zu LDMOS weisen HV-HBTs zudem eine größere Bandbreite auf und können damit auch für Multi-Band-Anwendungen eingesetzt werden.

Bild 4: Messung der Leistungsdaten eines HV-HBT-Transistors (Ausgangsleistung, Effizienz und Verstärkung als Funktion der Eingangsleistung) für eine Zelle mit 4000 μm² Emitter-Fläche bei 2 GHz und 26 V Kollektorspannung.
Fig. 4: Measured power performance (output power, PAE, and gain vs. input power) for a HV-HBT cell with 4000 μm² emitter area at 2 GHz and 26 V collector bias.

thermal and mechanical interconnect. This leads to excellent heat-sinking properties despite the GaAs substrate while keeping mounting efforts low. Fig. 2 presents the flip-chipped HBT power cell on the submount, Fig. 3 shows the device after housing in a standard power transistor package.

The measured power performance of the packaged HV HBTs is plotted in Fig. 4. The device is operated under class A-B conditions. It delivers an output power of up to 14 W at an excellent PAE of 70% and 14 dB gain. This

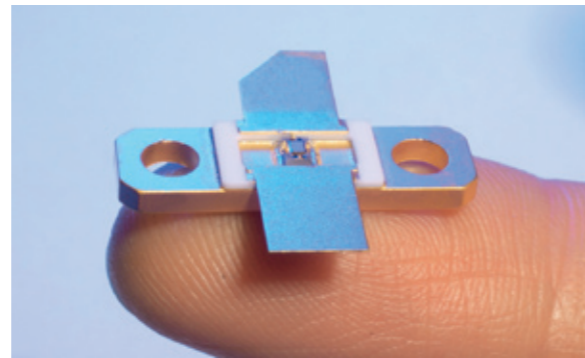
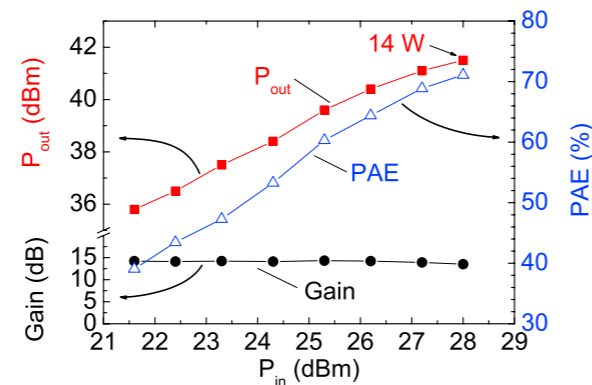


Bild 3: Der im Gehäuse montierte Leistungstransistor.
Fig. 3: The packaged HBT power transistor.

corresponds to a power density of 360 kW/cm², which is considerably higher than that of competing devices such as Si-LDMOS-FETs thus allowing to scale down chip-size for a given power. Moreover, HV HBTs offer a significantly larger bandwidth and, therefore, can be used also for multi-band applications.



Robuste rauscharme GaN-Verstärker-MMICs

Rauscharme Verstärker (LNAs) sind die empfindlichsten Komponenten in HF-Empfängern, weil sie für sehr geringe Signalpegel dimensioniert werden. Folglich sind sie sehr anfällig für Störungen durch unerwünschte Signale, die nicht nur äußeren Ursprungs sein müssen, sondern auch von benachbarten Komponenten desselben Systems ausgehen können. Letzteres ist z.B. in Satelliten der Fall, wo Übersprechen vom Leistungsverstärker des Senders den LNA des Empfängers zerstören kann, wenn keine Schutzmaßnahmen getroffen werden. Daher ist es wünschenswert, über robuste LNAs zu verfügen, die hohen Eingangsleistungen widerstehen können ohne zu degradieren. Solche Komponenten ermöglichen vereinfachte Empfängerkonzepte, die ohne spezielle Schutzschaltungen auskommen. In dieser Hinsicht eröffnet die GaN-HEMT-Technologie aufgrund der hohen erreichbaren Durchbruchspannungen und Leistungsdichten neue Möglichkeiten.

Mit dieser Motivation wurde ein extrem robuster zwei-stufiger LNA für Frequenzen von 3,5 bis 7 GHz entworfen und realisiert.⁴ Schaltbild und Chipfoto sind in den Bildern 1 und 2 zu sehen. Zwei 4x50 μm GaN-HEMTs mit 0,4 μm Gatelänge wurden verwendet, die im Arbeitspunkt V_{ce}=8 V, I_d=20 mA über Grenzfrequenzen von f_i=23 GHz und f_{max}=75 GHz verfügen. Luftbrücken, Spiralinduktivitäten, MIM Kapazitäten und NiCr-Widerstände stehen im koplanaren MMIC-Prozess ebenfalls zur Verfügung.

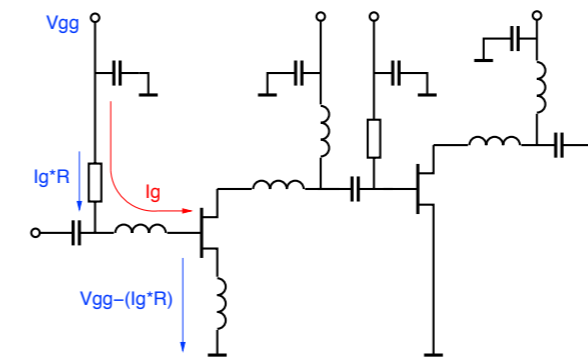


Bild 1: Schaltbild des GaN LNA.
Fig. 1: Circuit schematics of the GaN LNA.

Robust GaN Low-Noise Amplifier MMICs

Low-noise amplifiers (LNAs) represent the most sensitive part of an RF front-end designed for very low signal amplitudes. As a consequence, they are most sensitive also to overloading by unwanted signals, either from external sources or nearby components of the same system. This is the case, for instance, in satellites where crosstalk from the high-power transmitter easily can damage the receiver input if no protection measures are taken. Hence, LNAs are desirable that can sustain high levels of input power without degradation. These LNAs enable simplified front-end concepts without input protection circuitry. GaN HEMTs offer new possibilities in this respect due to their high breakdown voltages and their high power handling capabilities.

With this motivation, a highly rugged two-stage LNA was designed and fabricated for the frequency band 3.5 - 7 GHz.⁴ Circuit schematic and chip photo are shown in Figs. 1 and 2, respectively. Two 4x50 μm GaN HEMTs with 0.4 μm gate length are employed that provide cutoff frequencies of f_i=23 GHz and f_{max}=75 GHz at the bias point V_{ce}=8 V, I_d=20 mA. Air bridges, spiral inductors, MIM capacitances, and NiCr resistances are provided by the coplanar MMIC process.

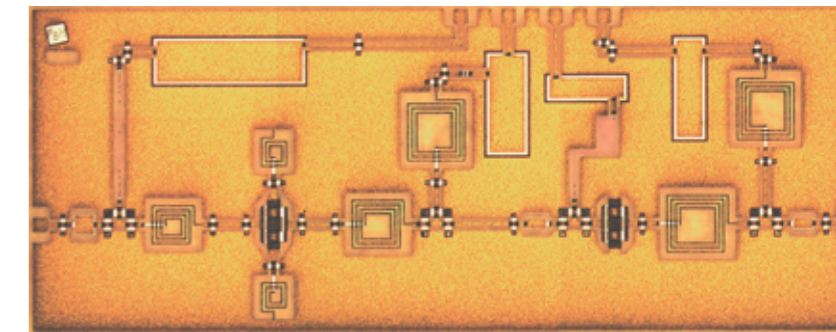
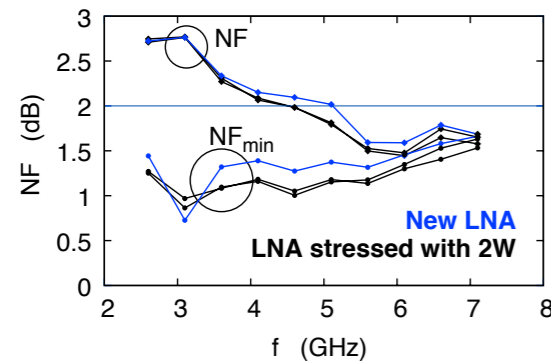


Bild 2: Chipfoto des koplanaren GaN LNA.
Fig. 2: Chip photo of the coplanar GaN LNA.

Bild 3 zeigt die gemessenen Resultate: Die Rauschzahl (NF) bleibt im Frequenzbereich von 3,5 bis 7 GHz unter 2,3 dB, wobei sie sich im engeren Band von 5 bis 7 GHz unter 1,8 dB bewegt. Diese Rauschzahlen können im internationalen Vergleich gut bestehen. In bezug auf die Robustheit konnte demonstriert werden, dass der LNA im 50-Ω-System Eingangsleistungen von 33 dBm mindestens 16 h standhält ohne zu degradieren. Dieser extrem harte Stresstest übertrifft vergleichbare in der Literatur berichtete Tests. Wird die Eingangsleistung auf 36 dBm erhöht, so zeigt der HEMT eine geringe irreversible Erhöhung des Gate-Leckstroms. Dieser verschlechtert die Rauscheigenschaften, ist in den übrigen elektrischen Messdaten aber nicht sichtbar.



A noise figure (NF) below 2.3 dB is measured from 3.5 to 7 GHz, with NF < 1.8 dB between 5 GHz and 7 GHz, and 20 dB gain, see Fig. 3. These results compare well with data reported in the literature. The LNA has been proven to survive 33 dBm of input power into a 50 Ω system for up to 16 hours without any degradation. This extremely severe stress test significantly exceeds the tests reported in the literature. Increasing input power to 36 dBm resulted in a slight irreversible increase in gate current, affecting only the noise performance but leaving the other electrical parameters unchanged.

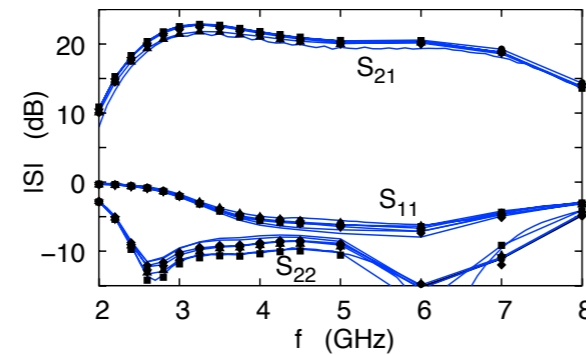


Bild 3: Rauschzahl NF (a) und S-Parameter (b) des GaN LNA vor und nach dem Stresstest.
Fig. 3: Noise figure NF (a) and S-parameters (b) of the GaN LNA before and after stress test.

Die Untersuchung des Verhaltens des LNA bei starker Übersteuerung durch hohe Eingangsamplituden ergab, dass die Degradation maßgeblich durch den Gatestrom verursacht wird, der dann fließt, wenn hohe Eingangsamplituden die Gatediode in Durchlassrichtung polen.⁵ Andere Mechanismen, wie hohe Verlustleistungen, Gate- oder Draindurchbruch hingegen sind nicht relevant. Der große Widerstand, der zur Spannungsversorgung am Gate eingesetzt wird, führt zu einer Rückwirkung, die den Gatestrom reduziert, indem die Gatespannung abgesenkt wird, im vorliegenden Fall von -5 V bei kleinen Eingangsleistungen bis zu -35 V bei 36 dBm. Zeitbereichsmessungen einzelner HEMTs, die in gleicher Weise betrieben wurden, zeigen, dass der dynamische Spannungshub in diesem Fall -70 V unterschreitet, ohne einen Durchbruch zu verursachen. Obwohl der HEMT in Kompression geht, bleiben Ströme und Spannungen im sicheren Bereich. Dies beweist, dass die den GaN-HEMTs inhärenten hohen Durchbruchspannungen den Schlüssel zur Realisierung robuster rauscharmer Verstärker darstellen.

Analysis of the operation under high input overdrive revealed that the main degradation mechanism is due to the gate current that flows when the gate is driven into saturation by high input-voltage swings.⁵ Other mechanisms, like high total dissipated power, gate or drain breakdown are not present. The high value chosen for the DC feed resistance at the input yields a feedback effect that reduces gate current by shifting gate bias towards higher negative voltages, in our case from -5 V at low input powers to -35 V at 36 dBm of input power. Time-domain measurements of a single HEMT under the same operation condition shows that the dynamic gate voltage swings reach below -70 V without causing breakdown. Even though the HEMT is in compression, currents and voltages at the drain stay well within the safe operation region. This proves that the high breakdown voltages inherent to the GaN HEMTs are the key feature ensuring robustness of the LNA.

Miniaturisierte 24 GHz-Low-power-Frontends für Sensor-Netzwerke

Low-Power Miniaturized 24 GHz Front-Ends for Sensor Networks

Energieautarke Systeme mit kleinen Abmessungen und einer Funkschnittstelle ermöglichen es, multifunktionale und flexible Ad-hoc-Netzwerke aufzubauen, die für vielerlei Anwendungen gebraucht werden – von der Transport-Logistik bis zur Raumtemperaturüberwachung. Schlüsselbaustein ist das sogenannte elektronische Korn (e-Grain), ein multifunktionales energieautarkes elektronisches System mit einer Funkschnittstelle, das zusammen mit der Antenne in ein miniaturisiertes Gehäuse integriert ist. Die Weiterentwicklung dieses Konzeptes war das Thema eines BMBF-Projektes, das gemeinsam mit der TU Berlin sowie dem Fraunhofer-Institut IZM durchgeführt und Anfang 2006 abgeschlossen wurde.

Small form-factor autonomous systems with wireless connectivity offer the possibility to build up multifunctional and flexible ad-hoc networks, which may be used for various applications from transport logistics to temperature sensing. Key is the so-called electronic grain (e-grain), a multifunctional energy-autonomous electronic system including an RF transceiver, integrated with the antennas into a package of small dimensions. This is the topic of a research project completed in early 2006, performed jointly with the Technische Universität Berlin and the Fraunhofer IZM, funded by the German BMBF.

Der Beitrag des FBH umfasste das 24 GHz Low-Power-Frontend und seine Integration mit der Antenne in ein Gehäuse mit Abmessungen im 1 cm-Bereich. Um Raum-Diversität ausnutzen zu können, sollte die Antenne zudem eine Richtwirkung aufweisen. Diese Herausforderung wurde mit Hilfe eines Sandwich-Aufbaus und einer neuartigen Schlitzantenne gelöst. Auf der Schaltungsseite wurden 24 GHz-Oszillatoren mit geringer Leistungsaufnahme als MMIC entwickelt, die interessante Anwendungsmöglichkeiten nicht allein für e-Grain-Netzwerke, sondern auch andere mobile oder tragbare drahtlose Kommunikationssysteme im 24 GHz-Band eröffnen.

The FBH work packages comprised the low-power 24 GHz frontend and its integration together with an antenna into a single package with dimensions in the 1 cm range. In order to exploit space diversity, the antenna needs to provide directional radiation properties. This challenge was solved by means of a sandwich packaging approach and a novel slot antenna. Regarding the MMIC components, low-power 24 GHz oscillators were developed, which offer interesting potential not only for e-grain networks but also for other mobile or portable wireless systems in the 24 GHz ISM band.

Sandwich-Aufbau mit neuartiger Schlitzantenne

Sandwich package with novel slot antenna

Die innovative Schlitzantennenstruktur (patentiert) ist voll kompatibel mit einem planaren Aufbau und liefert ein Strahlungsdiagramm mit einem Maximum in dem jeweiligen lateralen Sektor.⁶ Die Bilder 1 und 2 verdeutlichen die Struktur, die aus insgesamt 4 Schlitzantennen-Sektoren besteht, die elektrisch durch Bump-Reihen voneinander getrennt sind. Das obere und das untere Substrat werden mit Hilfe eines Flip-Chip-Prozesses miteinander verbunden. Da die jeweiligen Substratseiten metallisiert sind, ergeben sich dadurch 4 Bandleitungs-Sektoren, die durch die Schlitze abstrahlen. Diese Struktur wirkt als resonante Antenne, die in diesem Fall für das 24 GHz ISM Band dimensioniert ist. Die HF-Frontend-Chips werden innerhalb dieser Bandleitungsumgebung angeordnet, während Batterie und Elektronikteile, die nicht zum HF-Teil gehören, oberhalb und unterhalb platziert werden können.

The innovative slot-antenna structure (patent issued) allows integration into a planar structure and radiation pattern with a maximum in the respective lateral sector.⁶ Figs. 1 and 2 illustrate the structure. It consists of 4 slot-antenna sections, which are separated by bump fences. The upper and lower substrates are mounted using a flip-chip process. Since the respective surfaces are metalized, 4 parallel-plate sections are formed which radiate through the slots. This structure acts as a resonating antenna, which in this case is designed for the 24 GHz ISM band. The RF frontend chips are located inside the parallel-plate environment while battery and low-frequency electronics can be stacked below and above. Fig. 3 shows the electric field distribution in the antenna plane. Only one sector is excited. One clearly observes the resonant behavior and the good separation between the different sectors due to the bump fences.

Bild 3 veranschaulicht die Verteilung des elektrischen Feldes in der Antennenebene. Es wird nur der im Bild untere Sektor angeregt. Man beobachtet klar die Resonanz-Ausformung des Feldes und die gute Trennung der einzelnen Sektoren durch die Bump-Reihen.

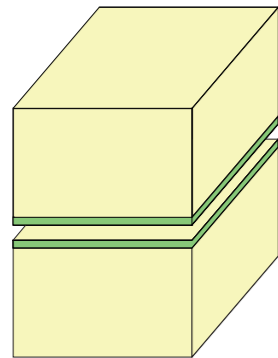


Bild 1: Skizze der Sandwich-Struktur mit integrierten Schlitzantennen, die in die 4 horizontalen Richtungen strahlen.

Fig. 1: Sketch view of the sandwich structure with integrated slot antennas radiating to the 4 lateral directions.

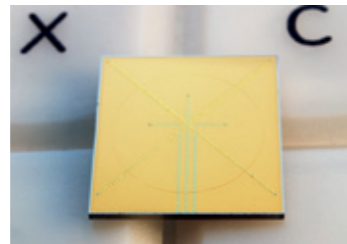


Bild 2: Unterer Teil der Struktur in Bild 1 vor der Flip-Chip-Montage. Das Foto zeigt das bereits metallisierte Substrat. Die kreuzförmig angeordneten Bump-Reihen trennen die einzelnen Antennensektionen. Es handelt sich um eine Teststruktur, weshalb die Antennen mit Koplanarleitungen extern gespeist werden.

Fig. 2: Lower part of the structure in Fig. 1 before flip-chip mounting. The photograph shows the metalized substrate. The cross-like bump rows separate the antenna sections. In this prototype, coplanar lines are used to excite the antennas.

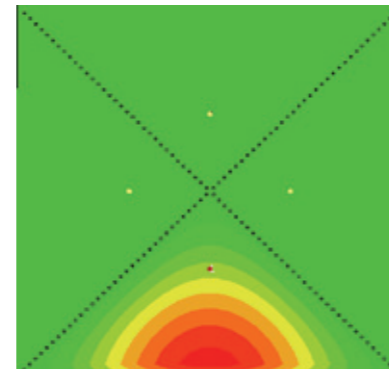


Bild 3: E-Feld-Verteilung innerhalb der Antenne, wenn nur der untere Sektor angeregt wird (Ergebnis anhand elektromagnetischer Simulationen, Draufsicht in der Antennenebene).

Fig. 3: E-field distribution within the antenna with only the lower sector excited (electromagnetic simulation data, top view in antenna plane).

Low-Power 24 GHz-Oszillator

Während die Forderung nach niedrigem Energieverbrauch im unteren GHz-Bereich, z.B. bei 2,45 GHz, vergleichsweise einfach zu erfüllen ist, stellt dies bei 24 GHz eine beachtliche Herausforderung dar. Die Schaltung wird in unserem Fall als GaAs-HBT MMIC auf dem FBH-Prozess realisiert (siehe Bild 4). Um höchstmögliche Effizienz zu erzielen, wird die Betriebsart AB gewählt. Dies ermöglicht, in Verbindung mit der Verwendung eines kleinen Transistors und eines angepassten Entwurfkonzepts, den Leistungsverbrauch deutlich zu senken. In Bild 5 sind Frequenz, Ausgangsleistung und Effizienz (HF-Ausgangsleistung im Verhältnis zur verbrauchten Gleichstromleistung) im Tuningbereich aufgetragen.

Für eine Versorgungsspannung von 2,5 V benötigt der VCO nur 7 mA Gleichstrom und liefert mehr als 4 dBm HF-Ausgangsleistung mit einer Effizienz von 15...18%. Dies stellt im 20 GHz-Bereich einen Rekordwert dar. Zusammen mit geeigneten Mischerschaltungen kann man so sehr leistungsarme Frontends realisieren. Diese Ergebnisse werden ergänzt durch Schaltungsentwicklungen für Frequenzteiler mit niedrigerem Leistungsverbrauch, die nach dem regenerativen Teiler-Konzept arbeiten.⁷

Low-power 24 GHz oscillator

While the requirement of low DC power consumption is relatively easy to be met in the lower GHz frequency range, e.g. at 2.45 GHz, it poses a significant challenge in the 24 GHz band. In our case, the circuit is realized as MMIC with GaAs-HBTs using the FBH process line (see Fig. 4). In order to maximize efficiency, class-AB operation is chosen. Together with small-size transistor cells and a careful circuit design, this allows to reduce DC consumption considerably. In Fig. 5, frequency, output power and DC-to-RF efficiency are plotted over the tuning range.

For 2.5 V bias, the VCO draws only 7 mA DC current and delivers more than 4 dBm RF power at 15...18% efficiency. This marks a record value in the 20 GHz band. Together with appropriate mixer circuits, it offers an interesting potential in realizing low-power RF frontends at 24 GHz. These results are complemented by results on low-power frequency dividers based on the regenerative concept.⁷

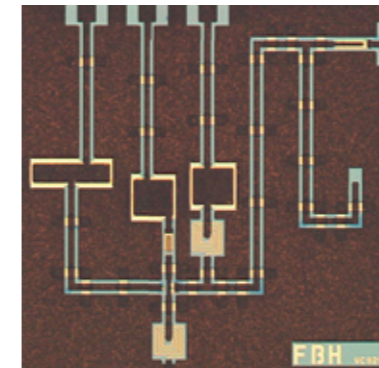


Bild 4: Chip-Foto des 24 GHz-Low-power-VCO mit 15% Effizienz.
Fig. 4: Chip photo of 24 GHz low-power VCO with 15% efficiency.

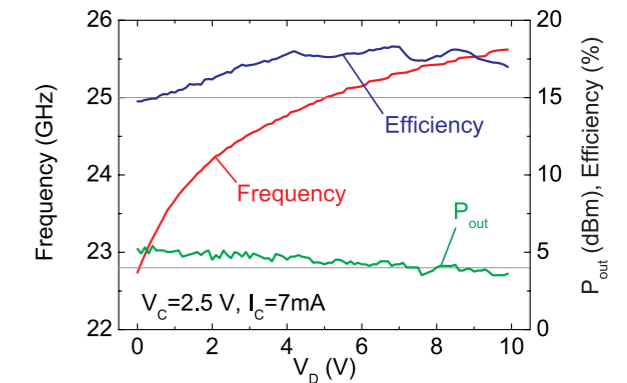


Bild 5: Frequenz, Ausgangsleistung und Effizienz des VCO als Funktion der Tuning-Spannung V_D . Für 2,5 V Versorgungsspannung werden 4...5 dBm Ausgangsleistung und 15...18 % Konversionseffizienz erreicht.

Fig. 5: Frequency, output power and efficiency of the VCO as a function of tuning voltage V_D . For 2.5 V bias, 4...5 dBm output power and 15...18 % DC-to-RF conversion efficiency are reached.

24 GHz-Kommunikationsstrecke

Um die Leistungsfähigkeit des Low-Power-Frontends mit der integrierten Antenne zu demonstrieren, wurde mit Hilfe der entwickelten Module eine drahtlose 24 GHz-Verbindung mit einer Bandbreite von mehreren MHz aufgebaut, mit der Videobilder übertragen werden können. Es wurde ein vollständiges System realisiert, das Bilder von einer Kamera zu einem TV-Gerät drahtlos bei 24 GHz überträgt. Der Hochfrequenzteil ist komplett in den miniaturisierten Modulen mit den Abmessungen von nur 1 cm x 1 cm x 0,5 cm integriert (siehe Bild 6).

24 GHz communications link

In order to demonstrate the capabilities of the low-power frontend with integrated antenna, the modules were used to set up a 24 GHz link with a bandwidth of several MHz, which can be used to transmit video pictures. A complete system was built and successfully demonstrated, realizing wireless transmission from a camera to a TV screen. The entire RF part is integrated in the new modules with dimensions of only 1 cm x 1 cm x 0.5 cm (see Fig. 6).

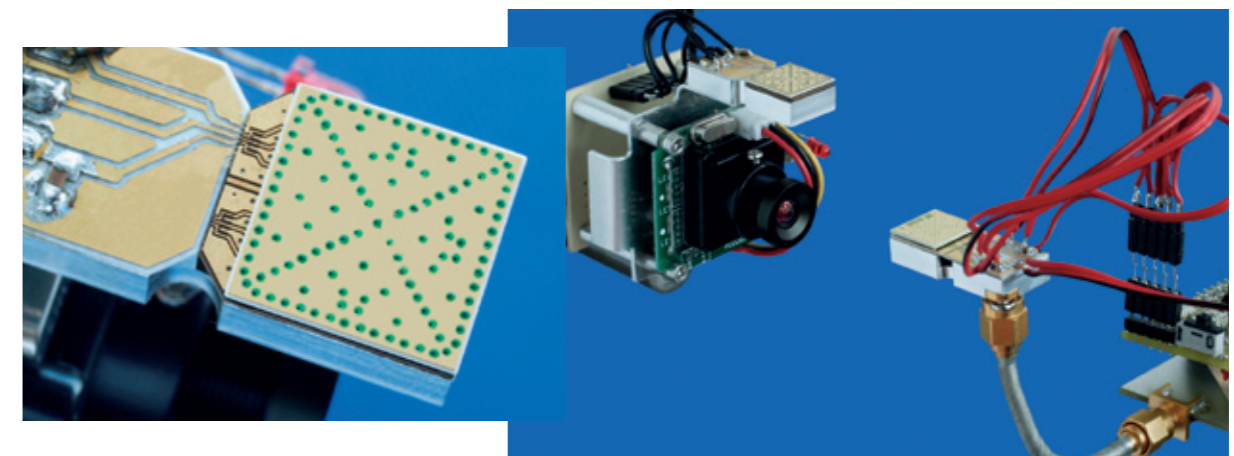


Bild 6: Miniaturisiertes 24 GHz-Frontend-Modul mit Antenne und integrierten Low-Power-MMICs (Größe 1 cm x 1 cm x 0,5 cm) und die Video-Übertragungsstrecke (rechtes Bild).
Fig. 6: Miniaturized 24 GHz frontend module with antenna and integrated low-power RF MMICs (size 1 cm x 1 cm x 0,5 cm) and the radio link for video transmission (right).

■ Mikrowellen-Plasma-Erzeugung

Die Plasmaerzeugung mit Mikrowellenfrequenzen, insbesondere im 2,45 GHz-ISM-Band, eröffnet eine Vielzahl von Anwendungen in der Medizin, der Biologie, bei der Halbleiterfertigung und der industriellen Oberflächentechnik. Die vielfältig industriell genutzte Niederdruck-Plasmatechnik erfordert ständig Verbesserungen hinsichtlich Qualität und Effizienz sowie der Reduzierung von Kosten. Auf der anderen Seite gewinnt der neu entstehende Bereich der atmosphärischen Mikroplasmen immer mehr Aufmerksamkeit, da sich hier sowohl ein hohes Potential für neue Plasmaanwendungen als auch die Chance für den Transfer von Niederdruckanwendungen in den kostengünstigeren atmosphärischen Bereich ergibt.

In beiden Bereichen ist die Anwendung von Mikrowellenfrequenzen derzeit durch die Nachteile der verfügbaren Magnetron-Quellen und Probleme bei der Übertragung von Mikrowellenenergie vom Generator zum Plasma limitiert. Es besteht deshalb ein Bedarf für integrierte halbleiterbasierte Systeme aus Generator und Elektroden, die zuverlässig sind und einfach in die Anwendungen integriert werden können. Insbesondere kann das hohe Potential von effizienten hochdichten atmosphärischen Mikrowellenplasmen nur nutzbar gemacht werden, wenn kleine integrierte Plasmaquellen verfügbar sind. Daher stellt dieser Bereich eine interessante Anwendung und Erweiterung der FBH-Aktivitäten im Bereich der III-V-Leistungskomponenten dar.

Die Arbeiten zur Plasmaerzeugung sind im Jahre 2006 begonnen worden und auf zwei Richtungen fokussiert: (i) Hohlelektroden und (ii) resonante Plasmaelektroden. Im Folgenden werden erste Ergebnisse präsentiert.

■ Microwave Plasma Generation

Plasma generation at microwave frequencies, particularly in the 2.45 GHz ISM band, offers a variety of applications in medicine, biology, semiconductor industry and industrial surface engineering. The field of low-pressure plasma processing, which is widely used in industry, is permanently demanding for refinements and improvements in terms of quality, efficiency and cost. On the other hand, the new emerging field of atmospheric micro plasmas is gaining more and more attention due to its high potential in creating new plasma applications as well as because of the chance to transfer low-pressure plasma applications to much more cost-effective atmospheric processes.

In both fields, application of microwave frequencies today is limited by shortcomings of the available magnetron power-sources and by the problems associated with the microwave transmission from the source into the plasma. There is a need for an integrated semiconductor-based power source – electrode systems that are reliable and can be easily integrated in application systems. Particularly the high potential of efficient high-density atmospheric micro plasma sources can be addressed only if small integrated sources become available. Thus, this field represents an interesting application and extension of the FBH activities on microwave III-V power components.

The work on plasma generation at FBH has started in 2006 and is focussed in two directions: (i) Hollow electrodes and (ii) resonant plasma electrode structures. In the following, first results on both areas are presented.

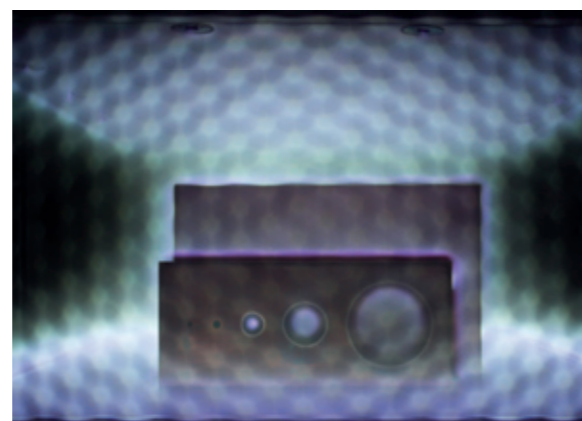


Bild 1: Hohlelektroden in einem Niederdruck-Hochfrequenzplasma.
Fig. 1: Hollow electrodes in a low-pressure RF plasma.

Bild 1 zeigt einen Testaufbau für Hohlelektroden verschiedener Durchmesser in einem Niederdruckplasma bei Hochfrequenz (13,56 MHz). Dieses Experiment soll dazu dienen, die optimalen Hohlelektrodengeometrien für verschiedene Gaszusammensetzungen und Prozessdrücke bis hin zum Atmosphärendruck zu bestimmen. Ziel ist es, Arrays aus einzeln ansteuerbaren atmosphärischen Mikroplasmen zu bauen, mit denen strukturierte Oberflächenbehandlungen durchgeführt werden können.

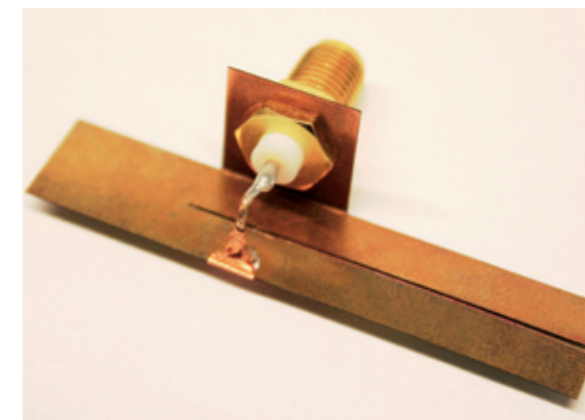


Bild 2: Lambda/4-Resonatorstruktur zur Erzeugung von atmosphärischen Mikrowellenplasmen.
Fig. 2: Quarter-wavelength resonant structure for atmospheric microwave plasma generation.

Bild 2 zeigt ein Beispiel für eine einfache resonante Plasmaelektrodenstruktur. Diese besteht aus einem Lambda/4-Resonator mit einer angepassten coaxialen Einspeisung. Am offenen Ende des Resonators entsteht eine Spannungsüberhöhung, die hoch genug ist, ein atmosphärisches Plasma zu zünden. Dies zeigt, dass bei Mikrowellenfrequenzen die für die Plasmaanregungen nötige Impedanztransformation durch relativ kleine, einfache und kostengünstige Komponenten erreicht werden kann. Überdies wurde ein interessanter Effekt beim Anwenden der Struktur in Bild 2 bei Atmosphärendruck beobachtet. Bild 3 zeigt das für Atmosphärenplasmen sehr ungewöhnliche Ergebnis: Die Entladung erstreckt sich homogen und stabil über eine Länge von etwa 10 mm, wobei kein externer Gasfluss und kein Barriereneffekt genutzt wird. Dieses Ergebnis ist vielversprechend, zum Beispiel für die Realisierung miniaturisierter Plasmaquellen, und muss noch weiter untersucht werden.

Fig. 1 shows a test setup for hollow electrodes with different diameters in a low-pressure low-frequency RF plasma (13.56 MHz). This experiment is to determine optimal hollow electrode geometries as a function of gas mixture and pressure up to the atmospheric pressure region. The final objective is to develop arrays of individually addressable atmospheric micro plasmas, which allow a structured surface treatment.

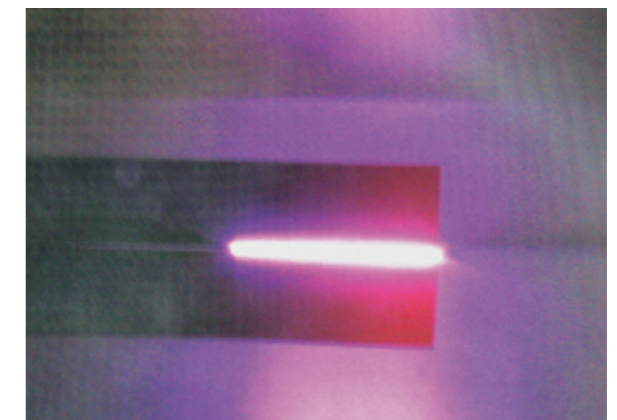


Bild 3: Atmosphärisches Mikrowellenplasma, erzeugt durch die Resonatorstruktur in Bild 2.
Fig. 3: Atmospheric microwave plasma generated by the quarter-wavelength resonator structure of Fig. 2.

Fig. 2 presents an example for a simple resonant plasma electrode structure. It consists of a quarter-wavelength resonator with a matched coaxial feed. At the open end of this resonator, voltages peaks occur that are high enough for atmospheric plasma ignition. This demonstrates that at microwave frequencies one can achieve the impedance transformation for plasma excitation by relatively small, simple and cheap components. Moreover, an interesting effect was observed when applying the structure according to Fig. 2 at atmospheric pressure. Fig. 3 shows the result, which is very unusual for atmospheric plasmas: the discharge extends homogeneously and stable over a length of about 10 mm without any external gas flow or barriers. This is promising, e.g. for realizing miniaturized plasma sources, and will be investigated in more detail in the future.

Ausgewählte Veröffentlichungen

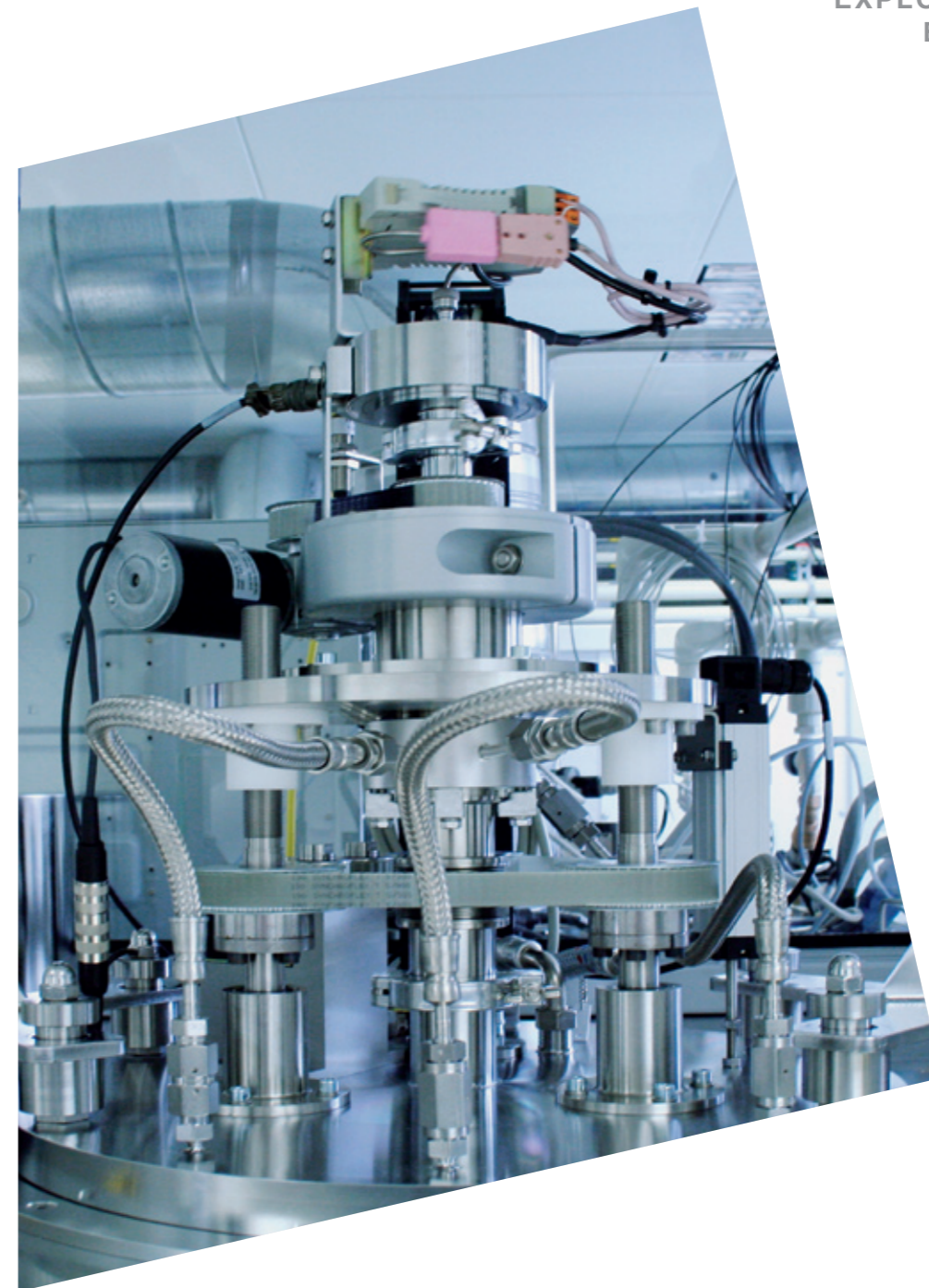
- ¹ J. Würfl, R. Behtash, R. Lossy, A. Liero, W. Heinrich, G. Tränkle, K. Hirche, G. Fischer, „Advances in GaN-based discrete power devices for L- and X-band applications,“ 2006 European Microwave Conference Digest, S. 1716 - 1718.
- ² R. Lossy, A. Liero, J. Würfl, G. Tränkle; “High power, high gain AlGaIn/GaN-HEMTs with novel power bar design”, IEDM Tech. Dig., S. 589 - 591, 2005.
- ³ Klockenhoff, R. Behtash, J. Würfl, W. Heinrich, and G. Tränkle, „A compact 16 Watt X-band GaN-MMIC power amplifier,“ 2006 Int. Microwave Symposium Digest, S. 1846 - 1849.
- ⁴ M. Rudolph, R. Behtash, K. Hirche, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, „A Highly Survivable 3–7 GHz GaN Low-Noise Amplifier“, 2006 Int. Microwave Symposium Digest, 2006, S. 1899 - 1902.
- ⁵ M. Rudolph, R. Behtash, R. Doerner, K. Hirche, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, „Analysis of the Survivability of GaN Low-Noise Amplifiers“, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 55, S. 37 - 43, Jan. 2007.
- ⁶ P.K. Talukder, M. Neuner, C. Meliani, F.-J. Schmückle, and W. Heinrich, „A 24 GHz active antenna in flip-chip technology with integrated frontend,“ 2006 Int. Microwave Symposium Digest, S. 1776 - 1779.
- ⁷ C. Meliani, F. Lenk, and W. Heinrich, „24 GHz low power VCOs and analog frequency dividers,“ 2006 Int. Microwave Symposium Digest, S. 1801 - 1804.

Selected Publications

- ¹ J. Würfl, R. Behtash, R. Lossy, A. Liero, W. Heinrich, G. Tränkle, K. Hirche, G. Fischer, „Advances in GaN-based discrete power devices for L- and X-band applications,“ 2006 European Microwave Conference Digest, pp. 1716 - 1718.
- ² R. Lossy, A. Liero, J. Würfl, G. Tränkle; “High power, high gain AlGaIn/GaN-HEMTs with novel power bar design”, IEDM Tech. Dig., pp. 589 - 591, 2005.
- ³ H. Klockenhoff, R. Behtash, J. Würfl, W. Heinrich, and G. Tränkle, „A compact 16 Watt X-band GaN-MMIC power amplifier,“ 2006 Int. Microwave Symposium Digest, pp. 1846-1849.
- ⁴ M. Rudolph, R. Behtash, K. Hirche, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, „A Highly Survivable 3–7 GHz GaN Low-Noise Amplifier“, 2006 Int. Microwave Symposium Digest, 2006, pp.1899 - 1902.
- ⁵ M. Rudolph, R. Behtash, R. Doerner, K. Hirche, J. Würfl, W. Heinrich, G. Tränkle, „Analysis of the Survivability of GaN Low-Noise Amplifiers“, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 55, pp. 37 - 43, Jan. 2007.
- ⁶ P.K. Talukder, M. Neuner, C. Meliani, F.-J. Schmückle, and W. Heinrich, „A 24 GHz active antenna in flip-chip technology with integrated frontend,“ 2006 Int. Microwave Symposium Digest, pp. 1776 - 1779.
- ⁷ C. Meliani, F. Lenk, and W. Heinrich, „24 GHz low power VCOs and analog frequency dividers,“ 2006 Int. Microwave Symposium Digest, pp. 1801 - 1804.

GESCHÄFTSFELDER & FORSCHUNG BUSINESS SEGMENTS & RESEARCH AREAS

EXPLORATIVE TECHNOLOGIEN
EXPLORATIVE TECHNOLOGIES



■ Einführung Geschäftsfeld Explorative Technologien

In Erweiterung seiner etablierten technologischen Arbeiten zu Galliumarsenid und verwandten Verbindungen erforscht das Ferdinand-Braun-Institut seit einigen Jahren neue Materialien, Prozesse und Bauelemente auf der Grundlage von III/V-Verbindungshalbleitern. Beispiele hierfür sind die Entwicklung eines Via-Hole Prozesses mittels Lasermikrostrukturierung oder die Erforschung der Transferred Substrate Technologie für schnelle InP-HBTs.

Im Vordergrund stehen gegenwärtig Materialien und Bauelemente auf Galliumnitrid-Basis (GaN). Diese sind interessant für eine Vielfalt von Applikation in der Mikrowellentechnik, Leistungselektronik und Optoelektronik. Beispielsweise ist die Entwicklung von blauen und grünen Laserdioden essentiell für kompakte Laserdisplays. Im Gegensatz zu herkömmlichen Lichtquellen, benötigen GaN-basierte Emittier zudem weniger Energie und haben eine höhere Lebensdauer. Ultraviolette Leuchtdioden, die unter anderem zukünftig zur Desinfektion von Trinkwasser eingesetzt werden können, eröffnen neue Einsatzfelder.

Von zentraler Bedeutung sind daher die Forschungsarbeiten zur Epitaxie von GaN-Substraten, die das FBH mittels Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) durchführt, und die Entwicklung reproduzierbarer Prozesse. Die am FBH verfügbare Expertise bei der Herstellung von GaN-basierten optoelektronischen und Mikrowellen-Leistungsbauerelementen erstreckt sich damit über die gesamte Herstellungskette: von der Substratherstellung und Epitaxie über die Prozesstechnologie und Bauelementephysik bis hin zur Aufbautechnik.

Um bei den Forschungen zu GaN international bestehen zu können, arbeitet das FBH seit 2006 eng mit dem TU-Professor Michael Kneissl zusammen. Michael Kneissl erforscht die Grundlagen des Materials an der Technischen Universität Berlin und arbeitet gleichzeitig mit einer Arbeitsgruppe am Ferdinand-Braun-Institut an den Anwendungen.

Das FBH arbeitet bei GaN in verschiedenen BMBF-Projekten mit. Über die frühzeitige Einbindung potenzieller Industriepartner ist gesichert, dass deren Erfordernisse in die Forschungsarbeiten mit einbezogen werden.

■ Introduction Explorative Technologies

In addition to its established technological works on gallium-arsenide and related semiconductors, FBH is exploring new III-V semiconductor materials, processes and devices since several years. Examples are the development of a via hole process using laser micro structuring and the research on transferred substrate technology for fast InP HBTs.

Currently, gallium-arsenide (GaN) based materials and devices are of central interest. They are attractive for a variety of applications in microwaves, power electronics and optoelectronics. The development of blue and green laser diodes for instance is essential for compact laser displays. Compared to conventional light sources, GaN based emitters require less energy and have a longer life time in addition. Ultraviolet LEDs open up new fields of applications as they can be used e.g. for water disinfection.

Hence, the research on epitaxy of GaN substrates carried out with Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) and the development of reproducible processes is of particular interest. FBH's expertise in the production of GaN based optoelectronic and microwave power devices covers the whole production chain: from substrates, epitaxy, process and device technology up to mounting.

In order to remain internationally competitive in GaN technology, FBH closely cooperates with the TU Professor Michael Kneissl since 2006. Michael Kneissl conducts basic research on the material at the Technische Universität Berlin and investigates future applications with a work group at the Ferdinand-Braun-Institut at the same time.

FBH works on gallium-nitride in different BMBF projects. In order to meet the requirements of industry, potential industrial partners are involved in the research process at an early stage.

■ GaN-Optoelektronik – Von ultravioletten Leuchtdioden bis zum blauen Laser

Das FBH ist seit August 2005 mit einer neuen Arbeitsgruppe auf dem Gebiet der GaN-basierten Optoelektronik tätig. Geleitet wird die Arbeitsgruppe von Prof. Kneissl, der gleichzeitig einen Lehrstuhl für Experimentelle Nanophysik und Photonik am Institut für Festkörperphysik der TU Berlin innehat. Kernpunkt der Forschungsvorhaben ist die Entwicklung innovativer Lichtemitter auf der Basis von GaN-Halbleitern. Durch die Kooperation mit der Arbeitsgruppe an der TU Berlin und weiteren Forschungsinstituten und Industriepartnern soll langfristig ein Schwerpunkt im Bereich GaN-Optoelektronik am FBH und am Wissenschaftsstandort Berlin etabliert werden.

Der außerordentlich große Wellenlängenbereich, welcher durch das Materialsystem AlN-GaN-InN abgedeckt wird, ermöglicht zahlreiche neue Anwendungsfelder für den Bereich GaN-Optoelektronik. Im Prinzip ist es möglich Laserdioden und LEDs vom tiefen UV über den gesamten sichtbaren Spektralbereich bis ins nahe Infrarot zu realisieren. Ein wichtiges Forschungsziel ist die Realisierung von InGaN-Laserdioden im blauen und grünen Spektralbereich. Anwendungen finden diese Bauelemente beispielsweise in Projektionsdisplays, beim Farbfotodruck, und als Anregungslichtquellen in der Biotechnologie, wie z.B. beim DNA Sequencing, dem Auslesen der genetischen Information aus der molekularen Struktur der DNA. Weitere Anwendungen, insbesondere für grüne Laser sind die Datenkommunikation mit Kunststofffasern („Plastic Optical Fibers“) und die medizinische Therapeutik. Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bilden GaN-Hochleistungslaser, die zunächst im Wellenlängenbereich um 400 nm realisiert werden sollen. Anwendungen finden diese Laserdioden vor allem in der Materialbearbeitung, wie z.B. Rapid Prototyping, oder in der Druckindustrie für Computer-to-Plate Verfahren. Den dritten Schwerpunkt bil-

■ GaN Optoelectronics – From Ultraviolet Light Emitting Diodes to Blue Lasers

In August 2005 the FBH has launched a new research group in the field of GaN optoelectronics, headed by Prof. Kneissl, who also holds a joint appointment at the Institute for Solid State Physics at the TU Berlin, where he is leading the experimental nanophysics and photonics group. The main focus of the GaN optoelectronics group is the development of novel GaN based light emitters. The goal is to establish a new center of excellence in the area of GaN optoelectronics at the FBH in cooperation with research groups at the TU Berlin, as well as other research organizations and industrial partners in Berlin.

Due to the extraordinary wide range of emission wavelengths that are accessible within the AlN-GaN-InN alloy system, the development of GaN optoelectronic devices can enable a multitude of new applications. The emission of GaN laser diodes and LEDs can be tuned over large parts of the ultraviolet spectral region, as well as the entire visible spectrum and even access the near IR. One of the main goals is the realization of InGaN laser diodes for emission in the blue and green spectral range. Applications for blue and green lasers include, for example, projection displays, color photo printing, and excitation sources for biotechnology applications, like DNA sequencing, i.e. deciphering the genetic information from the molecular structure of DNA. Additional applications include data communication via plastic optical fibers and medical therapeutics. GaN high-power lasers present another area of research, with the initial focus on 400 nm emitters. Applications for GaN-based

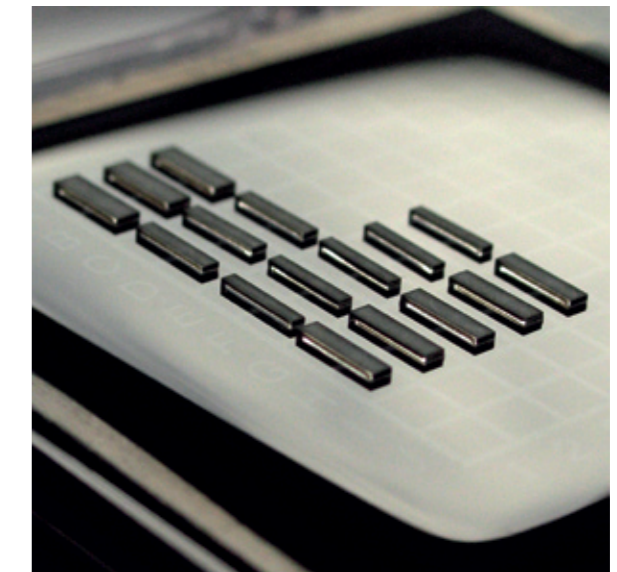


Abb. 1: GaN-Laserbarren auf Saphirsubstrat mit gespaltene Facetten.
Fig. 1: GaN laser bars on sapphire substrate with cleaved facets.

det die Realisierung von hocheffizienten Leuchtdioden im nahen und fernen UV. Hierfür finden sich vor allem interessante Anwendungsfelder bei der Reinigung von Trinkwasser im städtischen und industriellen Bereich, bei der Detektion organischer Verbindungen mittels Autofluoreszenz in der Biotechnologie und medizinischen Diagnostik oder beim Aushärten von Polymeren und Epoxydharzen. Weitere Anwendungen sind die Kontrolle von Lebensmitteln auf Rückstände (z.B. Pestizide), Inhaltsstoffe oder auch Frische sowie die Sterilisation und Abtötung von Keimen. Insbesondere für mobile Anlagen und Sensornetzwerke würden kompakte UV-Quellen auf Halbleiterbasis neue Möglichkeiten erschließen. Darüber hinaus sollen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern komplexe Laserstrukturen wie GaN-basierte Halbleiterscheibenlaser, GaN-DFB-Laser oder Superluminescent LEDs entwickelt werden, beispielsweise für Anwendungen in holographischen Datenspeichern oder in der medizinischen Diagnostik.

Ziel der Forschungsvorhaben am FBH in den vergangenen eineinhalb Jahren war es zunächst, Wachstumstechnologien und Bauelementheterostrukturen zur Realisierung von Diodenlasern im Wellenlängenbereich um 400 nm zu etablieren. Die Forschungsarbeiten betrafen im Wesentlichen die Epitaxie und die Prozessentwicklung, um an das internationale Spitzenniveau im Bereich 400 nm Laser anzuschließen. Zur Epitaxie von Nitriden gab es am FBH bereits aus dem Vorfeld umfangreiche Erfahrung mit der Herstellung dicker GaN-Schichten mittels HVPE. Schichten für HFETs werden seit Frühjahr 2005 in einem Multiwafer MOVPE-Reaktor (11x2") hergestellt. Diese Erfahrung und Infrastruktur diente als Basis für die Entwicklung von optisch gepumpten kantenemittierenden Laserstrukturen bei 400 nm. Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich zunächst auf das Wachstum defektarmer GaN-Schichten auf Saphir-Substraten, die Epitaxie von AlGaIn/GaN Übergitterstrukturen für die Lasermantelschichten in der Separate Confinement Heterostructure und die Optimierung des Verstärkungsmediums bestehend aus InGaIn-Vielfachquantentopfstrukturen. Trotz der kurzen Vorlaufzeit ist es bereits Ende 2005 gelungen, erste optisch gepumpte Laser im violetten Spektralbereich zu demonstrieren, die Schwellleistungsdichten um die 110 kW/cm² aufwiesen, was dem State-of-the-Art im Bereich GaN-Lasertechnologie entspricht. Seit Sommer 2006 steht ein weiterer MOVPE-Reaktor (1x2") zur Verfügung, der es erlaubt auch p-dotierte Schichten zu epitaxieren und es somit ermöglicht, elektrisch gepumpte GaN-Laserdioden und LED-Strukturen zu rea-

high-power lasers are materials processing, e.g. rapid prototyping, and computer-to-plate applications in the offset-printing industry. Highly efficient light emitting diodes (LEDs) in the near and deep UV constitute a third focus on the research agenda. Important applications include purification of drinking water, detection of organic compounds via autofluorescence for biotechnology applications, as well as UV curing of polymers and epoxies. Further applications are testing of food for toxic contaminants (e.g. pesticides) or freshness, as well as food sterilization. Compact UV semiconductor sources offer also interesting possibilities for mobile communication and sensor networks. We are also planning to work on custom laser structures, like GaN-based semiconductor disk lasers, GaN DFB lasers or superluminescent LEDs in cooperation with industrial research partners. These devices find applications, for example, in holographic optical storage systems and medical diagnostics.

The main goal of the research activities at the FBH in the past eighteen months was to develop growth technologies and device heterostructures in order to realize diode lasers in the 400 nm wavelength range. The focus of the research activities was geared towards developing MOVPE growth and device fabrication processes, in order to establish a know-how on par with the international level of 400 nm laser technologies. The FBH had already accumulated extensive experience with the epitaxial growth of nitride materials and HVPE of thick GaN layers. Since spring of 2005 GaN-based HFET heterostructures are grown in a multi-wafer MOVPE system (11x2"). These experiences and infrastructure created the basis for the development of optically pumped laser heterostructures with emission near 400 nm. The initial focus of the research activities concentrated on the growth of low defect density GaN layers on sapphire substrates, epitaxial growth of AlGaIn/GaN short period superlattices for the cladding layers of the separate confinement laser heterostructures, and the optimization of the gain medium consisting of InGaIn multiple quantum wells. Despite the short development time, we were able to demonstrate first optically pumped lasers in the violet spectral region at end of 2005, with threshold power densities near 110 kW/cm², corresponding to the state-of-the-art in the field of GaN laser technology. A second MOVPE system (1x2") went on-line in summer of 2006, which allowed us to grow p-doped GaN layers for the development of GaN-based injection laser diodes and LEDs. In parallel to the development of epitaxial growth for GaN laser heterostruc-

lisieren. Parallel zu den Fortschritten bei der Epitaxie der GaN-Laserheterostrukturen ist auch die Entwicklung in zahlreichen Bereichen der Prozesstechnologie für GaN-Emitter vorangekommen. Diese beinhalten unter anderem die Entwicklung von Laser-Scribing Prozessen zum Spalten von Facetten auf Saphirsubstraten, die Optimierung ohmscher Kontakte für n- und p-dotierte GaN-Schichten, die Realisierung von dielektrischen Schichten für die Ent- und Verspiegelung von Laserfacetten und die Entwicklung von Fabrikationsprozessen für LED- und Breitstreifenlaser-Teststrukturen. Im Januar 2007 ist es gelungen, erste InGaIn MQW Injektionslaserdioden auf Saphirsubstrat bei 405 nm mit Schwellstromdichten im Bereich von 7 kA/cm² zu demonstrieren. Mit Erreichen dieses Zieles ist ein weiterer Meilenstein bei der Etablierung des Technologiebereichs GaN-Optoelektronik geschafft. Damit zählt das FBH zu den wenigen Einrichtungen in Europa, die erfolgreich eine GaN-Lasertechnologie demonstrieren haben. Die weiteren Ziele für das laufende Jahr sind die Optimierung der Laserdioden bei 400 nm und die Demonstration erster cw-Laser auf GaN-Substraten. Parallel dazu wurde mit der Entwicklung von Leuchtdioden im nahen UV (375 nm) im Rahmen eines mit EFRE-Mitteln geförderten ProFIT-Projektes begonnen. Gleichzeitig laufen erste Vorarbeiten zur Epitaxie von AlIn- und AlGaIn-Schichten mit niedriger Defektdichte auf Saphirsubstraten und zum Wachstum von (Al)GaIn-Schichten auf nichtpolaren Kristallebenen, im Hinblick auf Emitter im fernen UV.

tures a number of development activities in the area of process technology for GaN-based emitter devices have progressed. Achievements include, for example, the development of a laser scribing process for the cleaving of laser facets on sapphire substrates, the optimization of n- and p-type ohmic contacts on GaN, the demonstration of dielectric mirror stacks for high reflective and AR coatings of laser facets, and the development of fabrication processes for LED and broad area stripe laser test structures. In January 2007 we were able to demonstrate a first InGaIn MQW injection laser diode on sapphire substrate emitting at 405 nm with threshold current densities as low as 7 kA/cm². This achievement marks another milestone on the way to successfully establish a center of excellence in the area of GaN optoelectronics in Berlin and at the FBH. With this achievement the FBH joins the small number of institutions in Europe, which has been able to successfully demonstrate a GaN laser technology. Near term goals for the year 2007 are the optimization of laser diodes emitting at 400 nm and the demonstration of first cw lasers grown on bulk GaN substrates. We have also started a new effort on the development of UV light emitting diodes (375 nm) in connection with a project funded by EFRE and investigating epitaxial growth of low defect density AlIn and AlGaIn lasers on sapphire substrates as well as growth of (Al)GaIn lasers on non-polar surfaces for light emitting diodes in the deep UV.

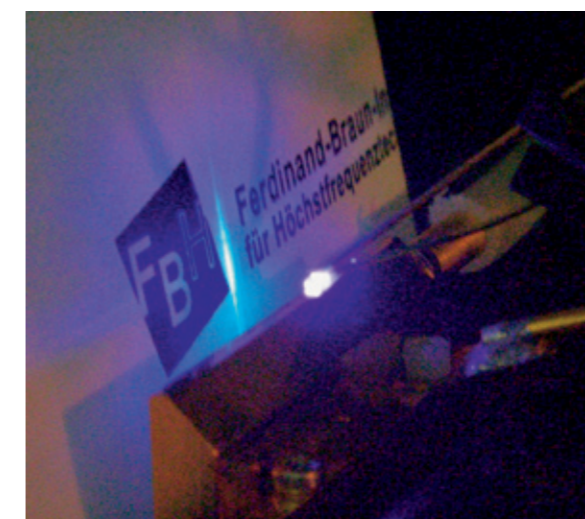


Abb. 2: Fernfeld einer InGaIn-MQW-Injektionslaserdiode auf Saphirsubstrat.
Fig. 2: Far field pattern of an InGaIn MQW injection laser diode on sapphire substrate.

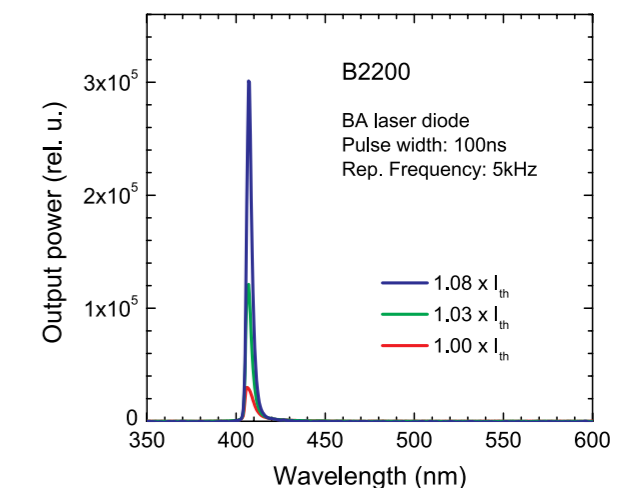


Abb. 3: Emissionsspektren von GaN-Laserdioden an und oberhalb der Laserschwelle.
Fig. 3: Emission spectra of a GaN based laser diode at and above threshold.

■ Laser-Mikrostrukturierung zur Erzeugung von Vias durch SiC-Substrate

Die Technik der Laserablation zur direkten Mikrostrukturierung ergänzt die traditionellen lithographischen Verfahren in der Prozesstechnologie. Die Methode der Laser-Mikromaterialbearbeitung ermöglicht eine effiziente Strukturierung sehr harter und chemisch inerte Materialien. Im Mittelpunkt der Arbeiten steht die Erzeugung von vertikalen Durchkontaktierungen (Vias) für AlGaIn/GaN-Hochleistungstransistoren (HEMTs), d.h. elektrisch leitender Verbindungen von den Source-Kontaktflächen auf der Bauelemente-Vorderseite zum Massepotential der Rückseite.

Die AlGaIn/GaN-HEMTs befinden sich auf einem 400 µm dicken Träger aus Siliciumcarbid (SiC), das sich durch eine extrem hohe chemische Stabilität und große Härte auszeichnet. Für die Herstellung von Vias besteht also die Notwendigkeit, das SiC und die GaN-Epitaxieschicht bis zu den Source-Kontaktflächen zu durchbohren und die Öffnungen zu metallisieren. Bei nicht abgedünnten SiC-Wafern sind trockenchemische Verfahren praktisch nicht möglich, da maximal Ätzraten von etwa 1 µm/min erreicht werden und gleichzeitig sehr hohe Anforderungen an eine inerte Maskierung gestellt werden. Die direkte Lasermikrostrukturierung von Vias ermöglicht im Gegensatz zum Trockenätzen ein maskenloses Verfahren. Mit einem frequenzverdreiften Nd:YAG-Laser können Mikro-Bohrungen in SiC mit hoher Geschwindigkeit und hohen Aspektverhältnissen erzeugt werden. Der Laser liefert Nanosekundenpulse mit hoher Energie im ultravioletten Spektralbereich und ist integriert in ein kommerzielles Laser-Materialbearbeitungssystem. Durch Kombination der CNC-gesteuerten Bewegung des Probenstisches und der Strahlablenkung mit einem Galvo-Scanner wird der Laserstrahl mikrometerngenau auf dem Werkstück platziert.

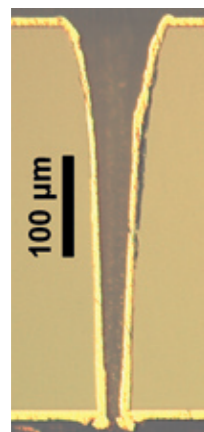


Abb. 1: Querschnitt Laserbohrung von oben bis zur Source-Kontaktfläche des Transistors (unten). Geschlossene Metallschicht, ca. 5 µm dick.

Fig. 1: Cross-section of a laser drilled hole from the top and drilled through the source pad of the transistor (on the bottom). Completely closed metal layer, approx. 5 µm thick.

■ Laser-Assisted Micro Processing of Vias through SiC Substrates

Direct micro processing by laser ablation assists the traditional lithographic techniques in device processing technology. The method of laser direct-write processing allows for efficient micro patterning of very hard and chemically inert materials. The work is focused on the fabrication of vertical interconnects (vias) for AlGaIn/GaN based high electron mobility transistors (HEMTs), i.e. electrically conductive connections between the source pads on the front of the devices and the ground on the backside.

The AlGaIn/GaN HEMTs are processed on 400 µm thick silicon carbide (SiC) substrates. SiC is chemically extremely stable and very hard. To process vias it is necessary to drill holes through the SiC and the GaN epitaxial layer to the source pads and to metallize the openings. Due to the low etch rates of about 1 µm/min it is not possible to create such holes by dry etching techniques unless the substrates are thinned-down and heavy-duty materials are available for inert masking. In contrast, direct laser processing allows for maskless processing of via holes in thick SiC. Using a frequency-tripled Nd:YAG laser micro holes can be drilled through SiC with high speed and high aspect ratio. The laser provides nanosecond pulses with high energy in the ultraviolet spectral range. It is integrated in a commercial laser workstation. By combining a CNC-controlled motion of the X-Y table that carries the target with a beam deflection by a galvo scanner the laser spot can be positioned with micrometer accuracy.

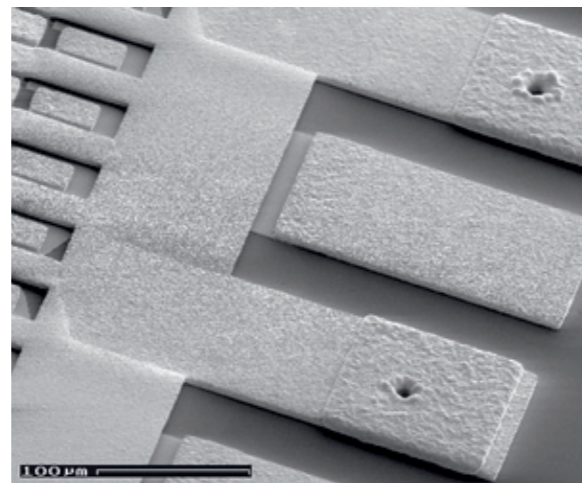


Abb. 2: REM-Bild: Details eines AlGaIn/GaN-Leistungstransistors mit Laser-Vias durch die Source-Kontaktflächen.

Fig. 2: Detailed view of an AlGaIn/GaN power transistor with laser vias through the source contact pads.

Der Laserstrahl hat einen Durchmesser von ca. 15 µm und wird auf der Probe bewegt, so dass konische Bohrungen mit einem mittleren Durchmesser von ca. 50 - 60 µm in 400 µm dickem SiC entstehen. Die Lochwände sind bedeckt mit einer glatten Schicht aus Materialablagerungen (nanokristallines Silicium und umgeschmolzenes SiC), deren Dicke je nach Tiefe zwischen 0,5 µm und 4 µm beträgt. Unter den Ablagerungen konnten keine laserinduzierten Materialveränderungen des Substrates, wie z.B. Mikrorisse oder ausgedehnte Kristalldefekte, identifiziert werden. Nach dem Laserbohren wird auf die Waferrückseite und die Lochwände eine dünne Metallschicht aufgedampft, die durch eine 5 µm dicke Goldschicht galvanisch verstärkt wird. Der in Abb. 1 gezeigte Querschliff durch ein vergoldetes Via verdeutlicht, dass die Goldschicht geschlossen ist. Widerstandsmessungen bestätigten, dass eine vertikale elektrische Verbindung durch das 400 µm dicke SiC besteht. In Abb. 2 sind die Source-Kontaktflächen eines Transistors gezeigt, die mit dem Laser von der Rückseite durchbohrt und elektrisch mit der Rückseite verbunden wurden. Durch geeignete Prozessführung können die Öffnungen auf der Bauelemente-Vorderseite bei der galvanischen Abscheidung geschlossen

The laser beam having a spot diameter of about 15 µm is guided on the sample to obtain conical holes with a mean diameter of 50 - 60 µm in 400 µm thick SiC. The sidewalls are covered by redeposited material (nanocrystalline silicon, resolidified SiC) that forms a smooth layer with a thickness between 0.5 µm and 4 µm at the laser exit and entrance, respectively. Beneath the deposits no evidence for laser-induced micro cracks, extended defects or crystal damage was found. After laser drilling the wafer's backside and the hole's sidewalls were metallized by depositing a thin conducting seed layer followed by electroplating 5 µm of gold. Fig. 1 shows a cross-section of a plated-through via exhibiting a completely closed gold layer. As confirmed by resistance measurements, a vertical electrical interconnect through the 400 µm thick SiC was established. In Fig. 2 the source pads of a transistor are shown, which were drilled through by the laser from the backside and electrically connected to the backside. By proper processing the openings on the device's front may be closed during electroplating (not shown). Vias with aspect ratios of about 8 have been realized. The successful implementation of the laser-assisted via technology into device processing was proven by dc

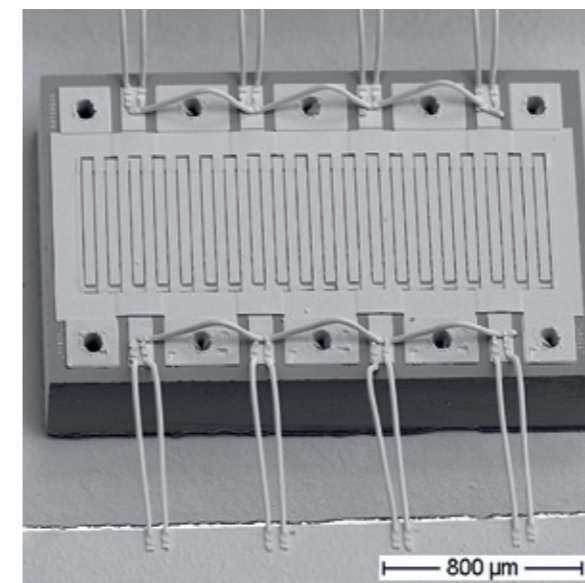


Abb. 3: REM-Bild: funktionsfähiger Transistor mit Laser-Vias durch die Source-Kontaktflächen (5x8x500 L-Band Powerbar).

Fig. 3: Mounted transistor device with laser vias through the source contact pads (5x8x500 L-band power bar).

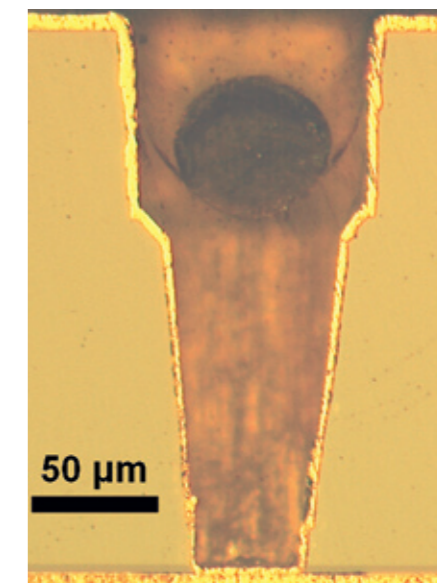


Abb. 4: Querschnitt Laserbohrung von oben. Laser stoppte im SiC-Substrat (vor der GaN-Schicht). Ätzen des Sacklochs bis zur unteren Metallschicht durch zweistufigen trockenchemischen Prozess, ca. 2 - 5 µm Goldschicht.

Fig. 4: Cross-section laser drilled hole from the top. Laser stopped in the SiC substrate (before GaN layer). Etching of blind hole until the lower metal layer by a two-step dry etching process, approx. 2 - 5 µm gold layer.

werden (nicht gezeigt). Die realisierten Vias haben ein Aspektverhältnis von ca. 8. Anhand der Transistor-Kennlinien konnte die erfolgreiche Implementierung des Laserbohrens von Vias in die GaN-Prozesstechnologie nachgewiesen werden. Für Abstände von größer als $1 \mu\text{m}$ zwischen Laserbohrung und Transistor-Gate wurde keine Degradation der DC-Kennlinien festgestellt. Abb. 3 zeigt einen aufgebauten Leistungstransistor mit Laser-Vias. Durch die vom Source-Kontakt auf kürzestem Weg nach unten geführte elektrische Verbindung erreicht man mit hoher Reproduzierbarkeit eine sehr geringe Induktivität, das Bonden wird vereinfacht und man kann Platz an der Chip-Peripherie einsparen. Leistungsmessungen der aufgebauten Transistoren mit Laser Vias ergaben Ausgangsleistungen von bis zu 40 W ($2,2 \text{ W/mm}$) bei 2 GHz . Erste vergleichende Untersuchungen zum Alterungsverhalten der lasergebohrten Transistoren ergaben keine Hinweise für eine beschleunigte Degradation im Vergleich zu ungebohrten HEMTs.

Ein zweites Verfahren für die Herstellung von Vias durch SiC beruht auf der Kombination von Laserbohren und trockenchemischem Ätzen von Sacklöchern. Hierbei wird die Laserbearbeitung gestoppt, bevor das Substrat vollständig durchgebohrt ist. Die so erzeugten Sacklöcher werden in einem zweistufigen trockenchemischen Ätzprozess materialspezifisch bis an die Vorderseitenmetallisierung weiter geätzt. Die lasergebohrten Löcher dienen dabei als Maske, d.h. die Strukturierung einer Ätzmaske ist nicht erforderlich. Die resultierenden Öffnungen mit Aspektverhältnissen von 3 - 4 wurden metallisiert. Abb. 4 zeigt den Querschnitt durch ein Sackloch-Via. Messungen des Durchgangswiderstands an einzelnen Sackloch-Vias in SiC ergaben Werte von $25 - 30 \text{ m}\Omega$ mit guter Reproduzierbarkeit und Homogenität.

Die Laser-Mikrostrukturierung ist kompatibel mit der III/V-Halbleitertechnologie und eröffnet neue Möglichkeiten für das Design von AlGaIn/GaN-Hochleistungstransistoren auf SiC.

Veröffentlichungen

O. Krüger, G. Schöne, A. Liero, J. Würfl, and G. Tränkle, „Laser drilling of microvias in silicon carbide for AlGaIn/GaN power transistors,“ in Proc. 3rd Int. WLT-Conf. Lasers in Manufacturing. E. Beyer, F. Dausinger, A. Ostendorf, and A. Otto, Eds., Stuttgart, Germany: German Sci. Laser Soc., 2005, S. 663 - 667.

and rf characterization. For distances between laser via and transistor gate of $>1 \mu\text{m}$ no degradation of the dc performance was found. Fig. 3 shows a mounted power transistor having laser vias. The realization of the vertical source interconnects, i.e. the shortest electrical connections between source on the front and ground on the backside, assures an excellent reproducibility of low-inductance ground connections, simplifies chip bonding and allows for novel space saving chip design. Measurements of the power performance of mounted transistors having laser vias demonstrated an output power of up to 40 W (2.2 W/mm) at 2 GHz . Preliminary results of dc life tests did not indicate an accelerated degradation of laser drilled transistors compared to their undrilled peers.

A second process for the formation of vias through SiC combines laser drilling with dry chemical etching of blind holes. In this case, the laser processing will be stopped before completely drilling through. The resulting blind holes will be etched in a two-step plasma etching process until the front metal will be excavated. The laser drilled holes serve as mask, i.e. they form the pattern to be projected and a time-consuming processing of an etch mask is not required. The resulting holes having aspect ratios of 3 - 4 were plated. Fig. 4 shows the cross-section of a blind via after electroplating. Measurements of the resistance through single blind vias revealed values of $25 - 30 \text{ m}\Omega$ and demonstrated good reproducibility and homogeneity.

The method of laser micro processing is compatible with III-V semiconductor device technology and offers new prospects for the design of high-power AlGaIn/GaN transistors on SiC.

Publications

O. Krüger, G. Schöne, A. Liero, J. Würfl, and G. Tränkle, „Laser drilling of microvias in silicon carbide for AlGaIn/GaN power transistors,“ in Proc. 3rd Int. WLT-Conf. Lasers in Manufacturing. E. Beyer, F. Dausinger, A. Ostendorf, and A. Otto, Eds., Stuttgart, Germany: German Sci. Laser Soc., 2005, pp. 663 - 667.

T. Wernicke, O. Krüger, M. Herms, J. Würfl, H. Kirmse, W. Neumann, G. Irmer, T. Behm, and G. Tränkle, „Analysis of materials modifications caused by UV laser micro drilling of via holes in AlGaIn/GaN transistors on SiC,“ Appl. Surf. Sci. 2007, in Druck.

R. Lossy, A. Liero, O. Krüger, J. Würfl, and G. Tränkle, „Gallium nitride powerbar transistors with via holes fabricated by laser ablation,“ phys. stat. sol. (c), vol. 3, no. 3, S. 482 - 485, Januar 2006.

O. Krüger, G. Schöne, T. Wernicke, R. Lossy, A. Liero, F. Schnieder, J. Würfl, and G. Tränkle, „Laser-assisted processing of VIAs for AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates,“ IEEE Electron Device Lett., vol. 27, no. 6, S. 425 - 427, Juni 2006.

O. Krüger, G. Schöne, T. Wernicke, W. John, J. Würfl, and G. Tränkle, „UV laser drilling of SiC for semiconductor device fabrication,“ Journal of Physics: Conference Series 2007, in Druck.

■ GaN-HVPE

Optoelektronische Bauelemente auf der Basis von Gruppe III-Nitriden haben in den letzten Jahren rasante Fortschritte gemacht. Blaue Laserdioden aus GaN ermöglichen die hohen Speicherdichten der neuen „Blue Ray“ DVDs und GaN-LEDs revolutionieren die Beleuchtungstechnik. Weitere potentielle Anwendungen, beispielsweise durch UV-LEDs oder die Erhöhung der Leistung bei blauen Laserdioden, werden jedoch dadurch erschwert oder verhindert, dass GaN-Substrate nicht durch die für Si und GaAs etablierten Verfahren der Kristallzucht hergestellt werden können. Für die meisten Anwendungen in der Optoelektronik wird daher Saphir als Substrat eingesetzt. Die damit verbundenen hohen Versetzungsdichten von bis zu 10^{10} cm^{-2} beeinträchtigen jedoch die Effizienz und Lebensdauer der Bauelemente erheblich. Durch dicke Pufferschichten aus GaN sowie weitere Maßnahmen der Defektreduktion kann die Versetzungsdichte zwar abgesenkt werden, jedoch bleibt sie weiterhin für viele Anwendungen zu hoch. Dazu kommen Probleme wie eine starke Durchbiegung der Schichtstrukturen durch unterschiedliche thermische Ausdehnung bis hin zum Zerreißen. Weltweit wird daher an Möglichkeiten zur Herstellung defektarmer GaN-Substrate geforscht. Der erfolgversprechendste Ansatz ist dabei die Hydridgasphasenepitaxie (HVPE: Hydride Vapor Phase

T. Wernicke, O. Krüger, M. Herms, J. Würfl, H. Kirmse, W. Neumann, G. Irmer, T. Behm, and G. Tränkle, „Analysis of materials modifications caused by UV laser micro drilling of via holes in AlGaIn/GaN transistors on SiC,“ Appl. Surf. Sci. 2007, in press.

R. Lossy, A. Liero, O. Krüger, J. Würfl, and G. Tränkle, „Gallium nitride powerbar transistors with via holes fabricated by laser ablation,“ phys. stat. sol. (c), vol. 3, no. 3, pp. 482 - 485, January 2006.

O. Krüger, G. Schöne, T. Wernicke, R. Lossy, A. Liero, F. Schnieder, J. Würfl, and G. Tränkle, „Laser-assisted processing of VIAs for AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates,“ IEEE Electron Device Lett., vol. 27, no. 6, pp. 425 - 427, June 2006.

O. Krüger, G. Schöne, T. Wernicke, W. John, J. Würfl, and G. Tränkle, „UV laser drilling of SiC for semiconductor device fabrication,“ Journal of Physics: Conference Series 2007, in press.

■ GaN HVPE

Optoelectronic devices based on group III-nitrides have significantly improved in performance within the recent years. Blue GaN laser diodes enable the high storage density of „Blue Ray“ DVDs and GaN LEDs improve electric lighting. Further potential applications for UV LEDs as well as the enhancement of the output power of laser diodes are restricted by the lack of native GaN substrates. Such substrates can not be manufactured by bulk crystal growth techniques used for Si and GaAs. For most optoelectronic applications sapphire is used as substrate. The resulting high dislocation densities of up to 10^{10} cm^{-2} limit device efficiency and especially life time. Thick GaN buffer layers and measures for defect reduction can be applied but still the dislocation density is too high for many applications. Additionally, the use of foreign substrates for example can result in strong bow due to different thermal expansion up to cracking of the layers. Consequently, there are worldwide efforts to develop native GaN substrates with low defect density. The most promising approach here is hydride vapor phase epitaxy (HVPE), which offers high growth rates and thus can be extended to the growth of bulk crystals. HVPE of GaN uses Ga, which is transported as GaCl via reaction with HCl. On the substrate it reacts with NH_3 (ammonia) to form GaN.

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 der BMBF-geförderten Vorhaben zu GaN wird am FBH die Herstellung von sehr dicken GaN-Schichten bis hin zu Massivkristallen mittels HVPE entwickelt. Dabei wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Konstruktion und dem Bau einer zur Herstellung von Massivkristallen geeigneten Zuchtungsanlage (Aixtron) über die Entwicklung von Prozessen zur Schicht- und 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 abgedeckt. Die Arbeiten am FBH konzentrierten sich auf die nötigen Teilprozesse für die Herstellung von n-leitenden GaN-Kristallen sowie auf die Evaluierung von Substraten in der MOVPE. Grundlagenuntersuchungen zum Schichtwachstum werden in einem horizontalen HVPE-Reaktor durchgeführt.

Basierend auf den Erfahrungen an diesem System wurde von Aixtron ein vertikaler Reaktor zur Herstellung von sehr dicken Schichten bis hin zu Einkristallen als Prototyp am FBH installiert und in Betrieb genommen (Abb. 1). Ausgangspunkt für die Kristallzucht müssen freistehende GaN-Wafer sein, da bei Wachstum auf Fremdsubstrat die unterschiedliche thermische Ausdehnung zu mechanischer Verspannung bis hin zum Zerreißen führen kann. Am FBH wurden zwei

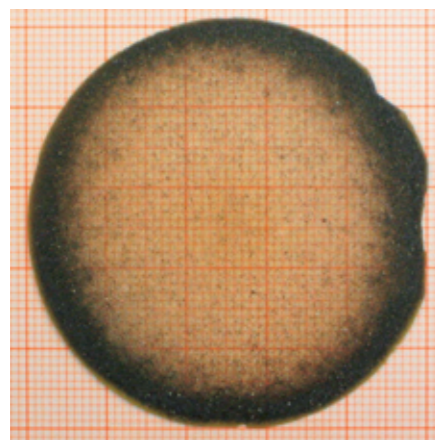


Abb. 2: Foto einer 160 μm dicken, freistehenden GaN-Schicht, die mittels HVPE auf dem neuartigen Substratmaterial LiAlO_2 abgeschieden wurde.
Fig. 2: 160 μm thick, freestanding GaN layer grown by HVPE on LiAlO_2 .

Within one of the GaN projects funded by the BMBF, 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) over 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. Research at FBH focuses on the process steps for n-type GaN crystals and the evaluation of the substrate in MOVPE. Basic investigations on growth mechanisms are being carried out in a horizontal HVPE reactor.



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

Based on the experience with this tool a vertical reactor designed for the growth of bulk crystals by Aixtron was installed at FBH (Fig. 1). Bulk crystal growth has to start from freestanding GaN wafers. When using foreign substrates different thermal expansion results in mechanical stress up to cracking of the wafers. At FBH two routes to freestanding GaN seed layers were developed and filed for patent. The first route to GaN seed wafers is the growth on LiAlO_2 [1]. This substrate material is of limited thermal stability. Using appropriate growth conditions the substrate decomposes and a freestanding GaN layer is released. For the first time HVPE-growth of thick c-plane GaN on (100) LiAlO_2 and subsequent self separation was demonstrated (Fig. 2).

Wege zu solchen freistehenden GaN-Schichten entwickelt und zum Patent angemeldet. Der erste dieser Wege zu freistehenden GaN-Schichten ist das Wachstum auf LiAlO_2 [1]. Dieses Substratmaterial hat eine begrenzte thermische Stabilität und kann durch geeignete Prozessführung so geschwächt werden, dass die Verbindung zwischen GaN-Schicht

The LiAlO_2 substrates are developed at Institute for Crystal Growth (IKZ). Self separation already during growth avoids additional process steps as well as bowing due to thermal mismatch when cooling down from growth temperature of around 1000°C to ambient temperature.

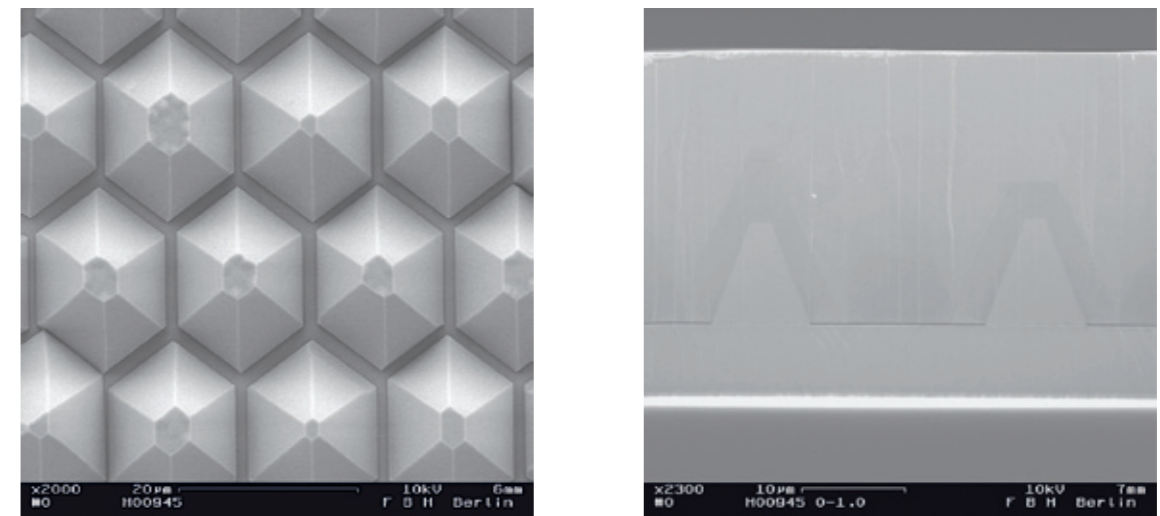


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von GaN-Pyramidenrümpfen zu Beginn des ELOG-Wachstums (links) und Querschnitt nach vollendeter Koaleszenz (rechts).
Fig. 3: SEM micrographs of GaN pyramids before (left) and cross section after coalescence in ELOG (right).

und Substrat während des Wachstums gelöst wird und sich freistehende GaN-Schichten ergeben. Es wurde weltweit erstmalig ein HVPE-Prozess entwickelt, der die Nukleation und das Wachstum dicker, c-flächenorientierter GaN-Schichten auf (100) LiAlO_2 sowie deren Selbstablösung ermöglicht (Abb. 2).

While the first route exploits the properties of the substrate, the second route utilizes the fact that GaN does not stick to WSiN or even is catalytically decomposed by its presence [2]. In ELOG (epitaxial lateral overgrowth) on GaN/sapphire templates patterned by a WSiN mask growth starts from the mask openings from where the islands coalesce (Fig. 3).

Die LiAlO_2 -Substrate werden vom Institut für Kristallzucht (IKZ) entwickelt und bereitgestellt. Die Selbstablösung schon während des Wachstumsprozesses erlaubt den Verzicht auf weitere Prozessschritte und vermeidet die Verbiegung der GaN-Schicht durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten beim Abkühlen von ca. 1000°C Wachstumstemperatur auf Raumtemperatur.

Since the layer is only attached to the substrate in the openings it can separate depending on mask geometry and temperature cycling resulting in a 2" GaN substrate (Fig. 4). The remaining wafer bow in HVPE of such thick layers is still not completely understood. It is probably caused by a point defect and dislocation concentration that change with thickness.

Während dieser erste Weg von einem neuartigen Substratmaterial ausgeht, nutzt der zweite Weg aus, dass GaN auf WSiN nicht haftet bzw. katalytisch zersetzt wird [2]. Beim ELOG-Prozess (epitaxial lateral overgrowth) auf mit WSiN -Masken strukturierten GaN/Saphir-Ausgangssubstraten startet das Wachstum in den

Besides the possibility of self separation ELOG results in a reduction of dislocation density and crack formation due to different lattice constants of substrate and GaN layer. Si doping from dichlorsilan (vapor pressure ~1.7 bar @ 20°C) has been developed at FBH. It yields

Fenstern der Maskierungsschicht, von wo aus die Inseln zusammenwachsen (Abb. 3).

Da die Schicht nur in den Fenstern mit der Unterlage zusammenhängt, kann sie sich in Abhängigkeit von der Maskengeometrie und der Temperaturführung von der Unterlage ablösen, wodurch ein 2" GaN-Substrat entsteht (Abb. 4). Forschungsgegenstand ist weiter die während des HVPE-Wachstums entstehende Restverkrümmung dieser Wafer. Diese wird durch die sich im Wachstumsverlauf verändernde Versetzungsdichte und Punktdefektkonzentration hervorgerufen.

Neben der möglichen Selbstablösung findet beim ELOG-Prozess eine Reduktion der Versetzungsdichte und der zur Rissbildung führenden, beim Wachstum auf Grund unterschiedlicher Gitterkonstanten beobachteten Verspannung statt. Mit der am FBH entwickelten kontrollierten Si-Dotierung aus Dichlorsilan (Dampfdruck $\sim 1,7 \text{ bar@20}^\circ\text{C}$) werden Dotierungen im geforderten Bereich bis $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ bei guten Ladungsträgerbeweglichkeiten erreicht [3]. Insgesamt stehen damit die nötigen Prozessmodule zum Wachstum n-leitender GaN-Massivkristalle unter Einsatz eines GaN-Startsubstrats bereit.

Die Züchtung von GaN-Massivkristallen im vertikalen HVPE-Reaktor (Prototyp der Firma Aixtron AG) erfordert die Lösung neuer technischer und wissenschaftlicher Fragestellungen. Technische Details mussten an die Erfordernisse des Dauerbetriebs bei hohen Temperaturen, der Abscheidung großer GaN-Dicken und einer Prozesskontrolle angepasst werden. Zur Prozesskontrolle dient ein von der Firma LayTec für

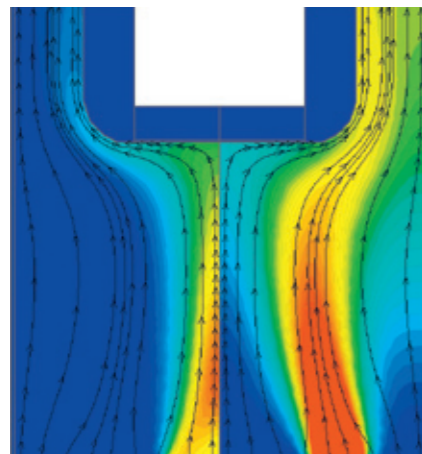


Abb. 5: Simulationsergebnis zu Partialdruckverteilungen von GaCl (linke Bildhälfte) und NH_3 (rechte Bildhälfte) im Reaktionsraum.
Fig. 5: calculated partial pressure profiles in the reactor chamber for GaCl (left) and NH_3 (right).

the required doping levels up to $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ with high carrier mobilities [3]. All in all the necessary process modules for growth of n-type GaN bulk crystals on GaN seed wafers are therewith available.

GaN bulk crystal growth in the vertical HVPE reactor (prototype by Aixtron) requires novel technical solutions. The system had to be adapted to continuous operation at high temperature and the deposition of thick layers. For process control a 3 λ -EpiTT specially designed by LayTec provides reflectance spectra together with the surface temperature on the wafer. The optimization of the reactor geometry as well as the process development is supported by numerical simulation of flow dynamics and chemical processes to achieve a high growth rate on the seed wafer with minimized parasitic deposition (Fig. 5).

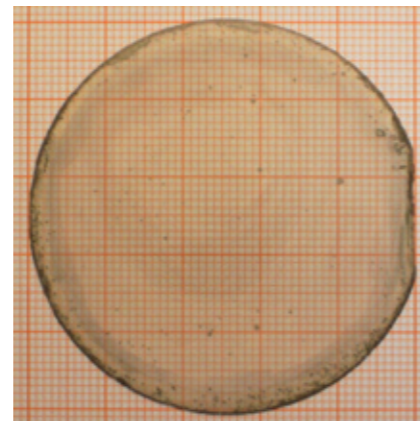


Abb. 4: Foto einer 400 μm dicken, freistehenden GaN-Scheibe mit 50,8 mm Durchmesser aus dem HVPE-ELOG-Prozess.
Fig. 4: 400 μm thick freestanding GaN wafer with 50.8 mm diameter grown by HVPE ELOG.

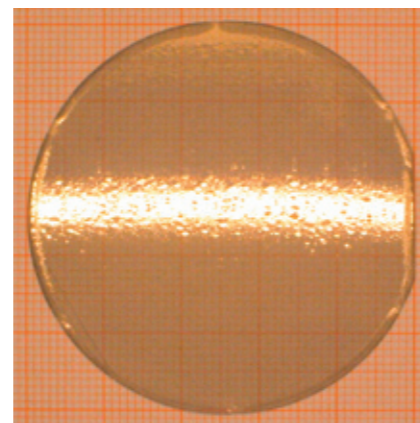


Abb. 6: Foto einer 127 μm dicken GaN-Schicht auf Saphir mit rissfreier Oberfläche aus der vertikalen HVPE-Anlage.
Fig. 6: 127 μm thick GaN layer on sapphire with crack-free surface from vertical HVPE.

diese Anlage entwickeltes 3 λ -EpiTT, das neben Reflexionsspektren von der Wachstumsfront auch eine genaue Prozesstemperatur am Wafer liefert. Die Optimierung der Reaktorgeometrie und die Entwicklung der Wachstumsprozesse sowie die Analyse der dabei auftretenden chemischen Bedingungen und Strömungsverhältnisse wird durch Simulationsrechnungen unterstützt, um eine homogene hohe Wachstumsrate auf dem Keimwafer bei minimierten parasitären Abscheidungen zu erreichen (Abb. 5).

GaN-Schichten von über 120 μm Dicke mit rissfreien Oberflächen und dem Erhalt der kristallinen Qualität der Startschicht wurden erreicht (Abb. 6). Bei der Erhöhung der Schichtdicke in den mm-Bereich zeigen sich jedoch erneut Morphologiestörungen durch die Ausbildung von Ätzgruben, die im Verlauf der weiteren Prozessentwicklung vermieden werden müssen. Im Ergebnis wurden Schichtdicken von über 1 mm erreicht und die Entwicklung wird zu Schichtdicken von 20 mm fortgesetzt.

Basierend auf den am FBH gewonnenen Erfahrungen ist mittlerweile die zweite, weiterentwickelte Generation dieses Reaktortyps in der Fertigung, die für noch größere Schichtdicken und auch einen größeren Kristalldurchmesser von bis zu 75 mm geeignet ist.

Veröffentlichungen

- [1] E. Richter, Ch. Hennig, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, P. Reiche, S. Ganschow, R. Uecker, K. Peters, „Freestanding two inch c-plane GaN layers grown on (100) γ -lithium aluminium oxide by hydride vapour phase epitaxy“, phys. stat. sol. (c) 3, S. 1439 - 1443 (2006)
- [2] Ch. Hennig, E. Richter, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, „Bowling of thick GaN layers grown by HVPE using ELOG“, phys. stat. sol. (c) 3, S. 1466 - 1470 (2006)
- [3] E. Richter, Ch. Hennig, U. Zeimer, L. Wang, M. Weyers, G. Tränkle, „N-type doping of HVPE-grown GaN using dichlorosilane“, phys. stat. sol. (a) 203, S. 1658 - 1662 (2006)

GaN layers of over 120 μm thickness with crack-free surface and the same crystalline quality like the template have been grown (Fig. 6). Thicknesses of more than one mm were achieved. For even thicker layers the observed surface deterioration by etch pits has to be avoided in order to continue the development towards 20 mm boules.

Based on the experience gathered at FBH meanwhile the second, improved generation of this type of reactor is being built. It is geared for longer and also thicker boules up to 75 mm diameter.

Publications

- [1] E. Richter, Ch. Hennig, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, P. Reiche, S. Ganschow, R. Uecker, K. Peters, „Freestanding two inch c-plane GaN layers grown on (100) γ -lithium aluminium oxide by hydride vapour phase epitaxy“, phys. stat. sol. (c) 3, pp. 1439 - 1443 (2006)
- [2] Ch. Hennig, E. Richter, U. Zeimer, M. Weyers, G. Tränkle, „Bowling of thick GaN layers grown by HVPE using ELOG“, phys. stat. sol. (c) 3, pp. 1466 - 1470 (2006)
- [3] E. Richter, Ch. Hennig, U. Zeimer, L. Wang, M. Weyers, G. Tränkle, „N-type doping of HVPE-grown GaN using dichlorosilane“, phys. stat. sol. (a) 203, pp. 1658 - 1662 (2006)

IMPRESSUM / IMPRINT

Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin – Germany
Phone: 0049.30.6392-2600
Fax: 0049.30.6392-2602
fbh@fbh-berlin.de
www.fbh-berlin.de

REDAKTION / EDITORS

Petra Immerz
Volker Bentlage

FOTOS / IMAGES

Ralf Günther (p. 29, 31 (2))
Bernhard Schurian (cover inside, p. 7, 8 (1, 2), 9 (1-3),
11 (1-3), 33, 36, 38 (1), 53, 62 (3), 66(2), 67(6), 71, 80 (1))
Norbert Schwarz (p. 30 (1))
Hans Wiedl (p. 28)
Josef Zens (p. 19 (1, 2))

eagleyard Photonics GmbH (p. 20 (2))
Jenoptik AG (p. 21)
ZEMI (p. 23 (1-3))

weitere Bilder & Grafiken: FBH
further images & graphics: FBH

LAYOUT & SATZ / LAYOUT & TYPESETTING

nana giorgadze – Studio Ralf Grömminger

DRUCK / PRINTING

LASERLINE Digitales Druckzentrum Bucec & Co. Berlin KG

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

© Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin 02/2007