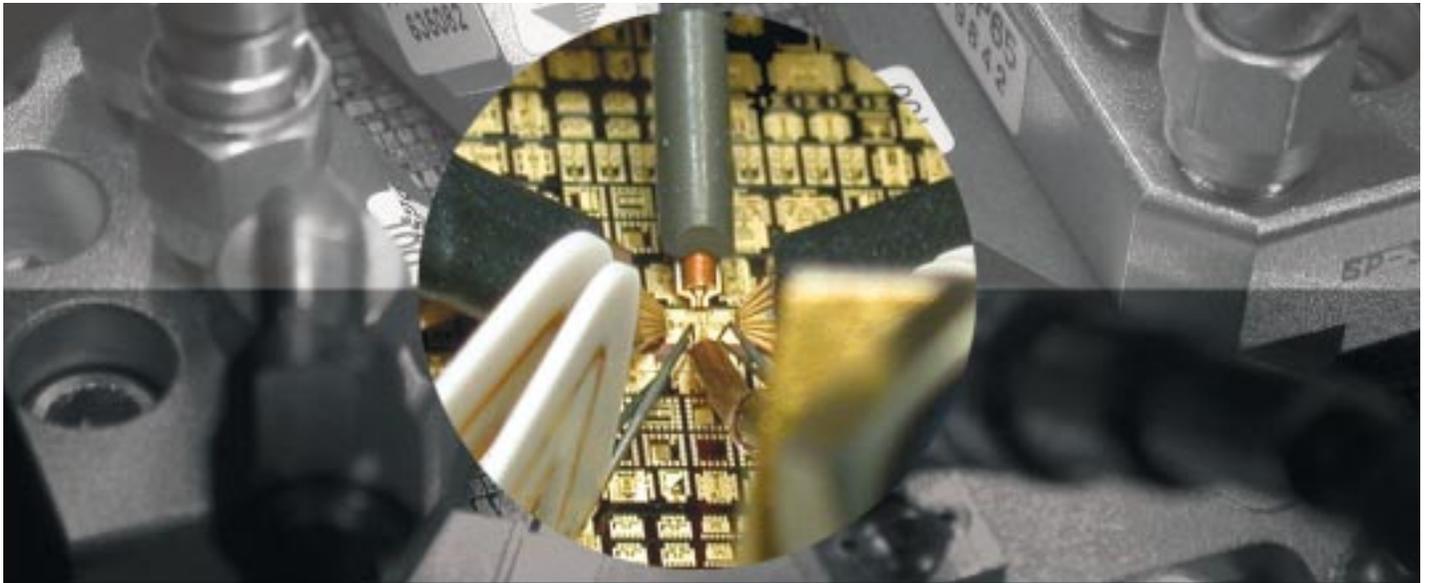




Fraunhofer Institut
Angewandte
Festkörperphysik

Annual Report Jahresbericht 2004



Cover: Automated on-wafer measurement of high-speed mixed signal ICs.
Titelseite: Automatisierte Messung von integrierten Mischsignal-Schaltungen auf dem Wafer.

Chip carrier substrates for mounting of high-frequency ICs integrated in modules with coaxial connectors.
Trägersubstrate für die Aufnahme von Höchstfrequenz-schaltungen, die in Module mit Koaxial-Anschlüssen integriert werden. ►

2004



Preface



The third major topic in defense related R&D is in MMICs with frequencies as high as several 100 GHz, or, as frequently and exuberantly claimed in the Terahertz region. Defense related applications of Terahertz techniques will include highest resolution radars and passive imaging systems, whereas commercial markets will focus in safety and security, environmental monitoring, medical applications, and space exploration. We cooperate with ESA (European Space Agency) here and are confident to contribute to this field which is gaining in importance within Fraunhofer-Gesellschaft.

Our experiences with the telecom sector were mixed in the past year. Whereas power amplifiers with (AlGa)N HEMTs find increasing interest for next generation wireless base stations, our mixed signal circuits for 80 Gbit/s and beyond found only limited markets, although these circuits – based on InP DHBTs – showed international state-of-the-art performance. We are able to supply all key components for high bitrates and we will observe the optical network hardware market closely.

In general, we look upon our outstanding competence in III-V technologies as a tool to bring about innovative solutions in sensor technology and communication, in medical applications, lighting, environmental sensing and – last but not least – in safety and security. We do this in cooperation with our partners – often relying on their systems competence. New products have resulted for the tool »chemical vapor deposition of diamond«, a now mature technology ready to be commercialized. This happened with a further spin-off: Diamond Materials GmbH (Advanced Diamond Technologies) founded at the end of the year.

This spin-off again shows that there are (niche) markets for novel materials and components, these can be served by small and flexible suppliers. We will continue to bring our R&D results to the market, either with partners or with spin-offs.

The past year saw first changes, these will continue in 2005. We dealt with the changing funding policy by changes in our R&D fields. We were able to keep our budget – and thus the staff – constant in 2004. Our equipment, and this holds especially for major tools as e-beam or optical lithography, has been renewed. Major investments, funded by BMBF and BMVg, were made into the equipment which enables IAF to operate successfully in the next decade, with the production of devices, circuits, and modules in small and medium volumes.

Changes also took place in the responsibilities for our Institute and the project management on the part of BMVg, this will be covered in detail elsewhere in this report. And finally, an earnest search was started to find a new director for Fraunhofer IAF, my active term nominally ending in 2005. You will find more on this in next year's Annual Report.

Finally I would like to thank for the generous support IAF experienced from many sides. Thanks are due to BMVg for basic funding and project financing, to BMBF for numerous projects, but also to the project managing institutions. The cooperation with industrial partners was invaluable and often instructive.

I express my heartfelt thanks to all colleagues who worked hard for the success of our Institute.

2004 was not as bad as feared by many. It was, in fact, almost a good year for Fraunhofer IAF, although the general reluctance of the past years to invest in technology oriented R&D did affect us again. This holds even more for the telecom sector, which is gaining only slowly. Fortunately, however, we were able to strengthen existing and start new cooperations in fields of leading competence.

Our defense related research again yielded excellent results, qualified cooperations will serve to ensure technology transfer into industry. Work on developing GaN power electronics for airborne radars was continued in a close cooperation with EADS, Ulm. The long-standing, successful cooperation with AIM, Heilbronn, led to innovations in the field of infrared sensors, especially with antimonide-based detectors, where IAF is leading worldwide. We formed a strategic alliance with AIM to cooperate on IR detector research, similar to the contract with EADS on GaN electronics signed in the year before. These measures will make sure that all developments are mutually agreed on and compatible with later industrial production.

Es war nicht so schlimm wie erwartet, das Jahr 2004. Es war sogar ganz gut für das Fraunhofer IAF, obwohl uns die seit Jahren allgemein zu beobachtende Zurückhaltung in technologiebetonten FuE-Feldern wiederum zu schaffen machte. Dies gilt vor allem im Telekommunikationssektor, der sich nur sehr langsam erholt. Umso erfreulicher war, dass dort, wo das Institut mit seinen Kompetenzen Alleinstellungsmerkmale hat, vorhandene Kooperationen ausgebaut und neue angefangen werden konnten.

Unsere wehrtechnische Forschung konnte wieder mit ausgezeichneten Ergebnissen aufwarten, wobei auch der Transfer dieser Ergebnisse in die einschlägige Industrie sichergestellt ist. Die Entwicklung der GaN-Leistungselektronik für luftgestützte Radare wurde in Zusammenarbeit mit EADS, Ulm, fortgesetzt. Die langjährige erfolgreiche Kooperation mit AIM, Heilbronn, führte zu Neuentwicklungen in der IR-Sensorik, speziell auf dem Gebiet der Antimon-haltigen Detektoren, wo das IAF weltweit führend ist. Mit AIM wurde auch ein Kooperationsvertrag abgeschlossen nach dem Muster der vorjährigen Vereinbarung mit EADS über Entwicklung und Einsatz der GaN-Elektronik. So möchten wir sicherstellen, dass der Technologietransfer langfristig gewährleistet ist.

Das dritte wesentliche Thema in der Verteidigungsforschung ist die Höchstfrequenzelektronik mit Frequenzen von einigen 100 GHz, nach gängigem (überschwänglichem) Sprachgebrauch also bereits die Terahertz-Technik. Während wehrtechnische Anwendungen hier in hochauflösenden Radaren und passiven bildgebenden Systemen liegen, wird die Terahertz-Technik auch zivile Märkte finden in Sicherheitstechnik, Umweltüberwachung, Medizintechnik und in der

Weltraumforschung. Hier arbeitet das IAF mit der ESA zusammen. Wir sind zuversichtlich, dass wir zu diesem aufkommenden Forschungsgebiet in der Fraunhofer-Gesellschaft beitragen können.

Unsere Erfahrungen mit der Telekommunikation waren gemischt in 2004. Während Leistungsverstärker auf GaN-Basis auf zunehmendes Interesse stoßen, z. B. für Mobilfunknetze der nächsten und übernächsten Generation, fanden die von uns entwickelten Mischsignalschaltungen für 80 Gbit/s und darüber nur kleine Märkte, obwohl unsere Schaltungen auf der Basis von InP-Doppelheterobipolar-Transistoren weltweite Bestwerte erreicht haben. Das IAF ist eine hervorragende Adresse für diese hochbitratigen integrierten Schaltungen, wir werden die Märkte aufmerksam verfolgen.

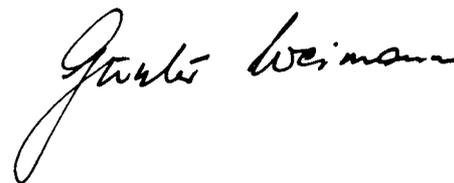
Wir verstehen unsere weitreichende Kompetenz in der III-V-Technologie mittlerweile als Werkzeug, um innovative Konzepte in der Sensorik und in der Kommunikation, aber auch in Medizintechnik, Beleuchtung, Umweltüberwachung und nicht zuletzt in Sicherheitstechnik zu verwirklichen – dies geschieht sehr oft auch mit der Systemkompetenz unserer Partner. Neue Produkte sind auch das Ergebnis des Werkzeugs »Diamantabscheidung«, wo eine Technologie ausgereift ist und damit kommerziell umgesetzt werden kann – hier mit einer weiteren Ausgründung am Fraunhofer IAF: Diamond Materials GmbH (Advanced Diamond Technologies). Auch diese Ausgründung zeigt, dass für zahlreiche hochentwickelte Materialien und Komponenten durchaus (Nischen-) Märkte vorhanden sind, diese können vorzugsweise von kleinen, flexiblen Anbietern bedient werden. Wir werden weiter FuE-Ergebnisse konsequent vermarkten – mit Partnern oder Spin-offs.

2004 hat einschneidende Veränderungen im IAF eingeläutet, diese werden sich in 2005 fortsetzen: Auf Veränderungen in der Förderlandschaft haben wir mit veränderten FuE-Schwerpunkten reagiert. Es ist uns gelungen, die Erträge und damit die Mitarbeiterzahl gleich zu halten. Die Ausrüstung des Instituts – vor allem bei den Großgeräten – ist »runderneuert«. Mit hohen Investitionen ist es gelungen, unsere großen (und teuren) Geräte zu erneuern, das Institut kann die Aufgaben der nächsten Jahre mit hochmoderner Ausrüstung angehen und dabei Bauelemente, Schaltungen und Module in kleinen und mittleren Serien herstellen.

Veränderungen haben sich auch in der Institutsbetreuung und in der Projektbegleitung seitens des BMVg ergeben, dies wird noch ausführlich in diesem Bericht angesprochen. Und schließlich hat im abgelaufenen Jahr die ernsthafte Suche nach einem Institutsleiter begonnen, meine aktive Zeit läuft in 2005 ab. Davon aber mehr im nächsten Jahresbericht.

Zum Schluss möchte ich für die großzügige Unterstützung danken, die dem IAF von vielen Seiten entgegengebracht wurde. Dank gebührt vor allem dem finanzierenden BMVg und dem fördernden BMBF und den Projektträgern. Die Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie war wertvoll, wir konnten dabei auch lernen.

Danke sage ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IAF, die zu unserem Erfolg in einem nicht ganz leichten Jahr beigetragen haben.



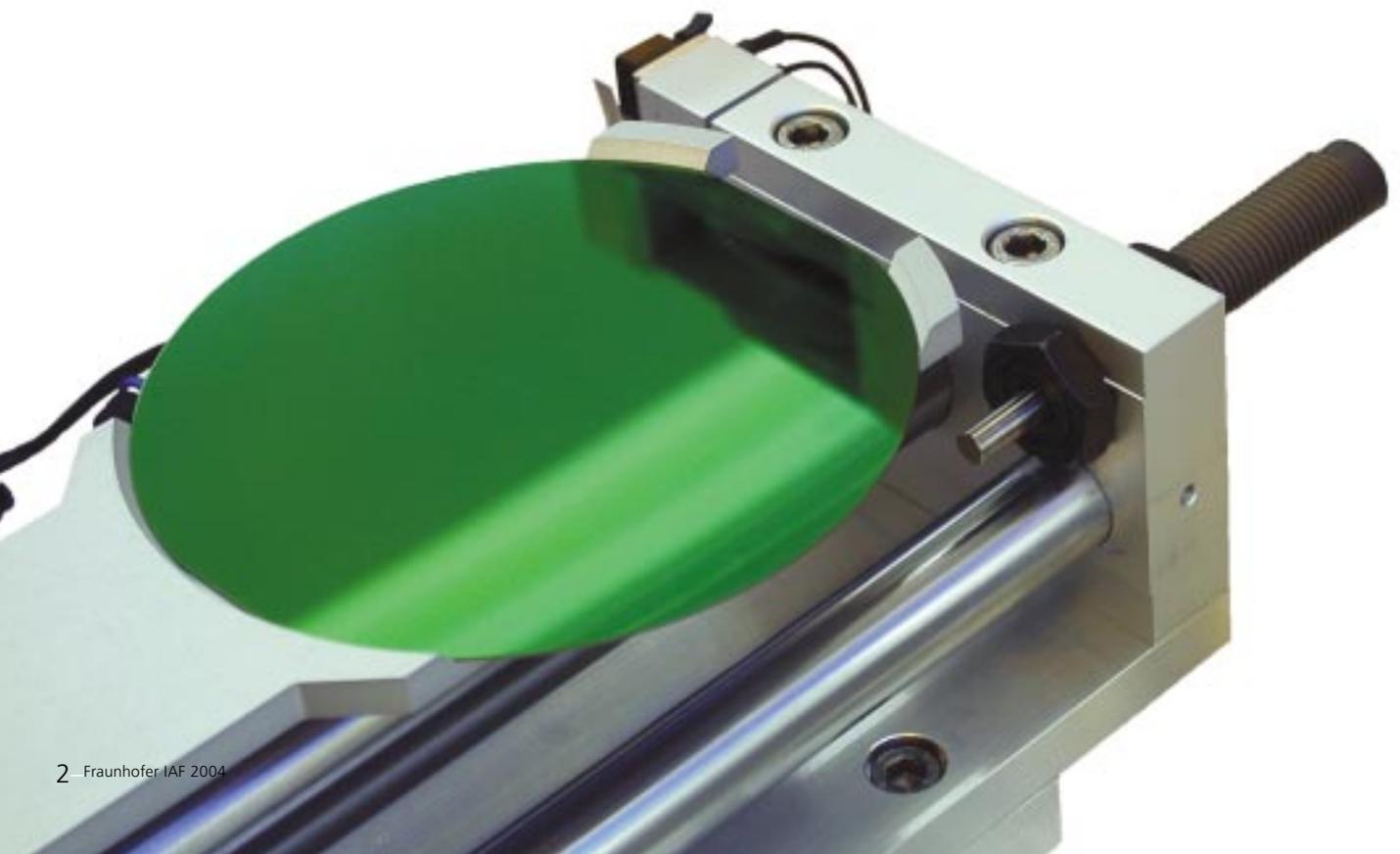
Günter Weimann



The Fraunhofer IAF – Profile and Research Areas	3
Advisory Board	6
News, Events, People	8
MMICs	16
- Terahertz Components	18
- GaN/AlGaN HEMT Microstrip MMICs and Base Station Power Amplifiers	26
MIXICs	32
- InP DHBT-Based Mixed-Signal Integrated Circuits for ≥ 80 Gbit/s Data Transmission	34
Infrared Sensors	42
- IR Camera for 3 – 5 μm With InAs/GaSb Superlattices	44
- Two-Photon QWIP	46
Semiconductor Lasers and LEDs	48
- Quantum Cascade Lasers for Gas Sensing	50
- Tunable Infrared Diode Lasers for Diagnostics	54
CVD Diamond	58
- Diamond Optical Components	60
Publications, Conferences, and Seminars	66
Patents	70
Committees, Conferences, and Exhibitions	71
Awards	72
Education and Teaching	72
Our Partners	73
Access	74

Das Fraunhofer IAF – Institutsprofil und Forschungsfelder	3
Kuratorium	6
Menschen und Momente	8
MMICs – Monolithisch integrierte Mikrowellen-Schaltungen	16
- Terahertz-Komponenten	19
- GaN/AlGaN-HEMT-Mikrostreifen-MMICs und -Leistungsverstärker für Basisstationen	27
MIXICs – Mischsignal-Schaltungen	32
- InP-DHBT-Mischsignalschaltungen für 80 Gbit/s und darüber	35
Infrarot-Sensoren	42
- Infrarot-Kamera für 3 – 5 μm mit InAs/GaSb-Übergittern	45
- Zwei-Photonen-QWIP	47
Halbleiter-Laser und LEDs	48
- Quantenkaskadenlaser für die Gassensorik	51
- Durchstimmbare Infrarot-Diodenlaser für die Diagnostik	55
Diamantscheiben	58
- Diamantbauteile für optische Anwendungen	61
Veröffentlichungen und Vorträge	66
Patente	70
Gremien, Tagungen und Ausstellungen	71
Auszeichnungen	72
Ausbildung und Lehre	72
Unsere Partner	73
Anfahrt	74

Transfer module of ICP etching system.
Transferarm eines ICP-Ätzers.



Profile of the Institute

The Fraunhofer IAF has long-standing tradition and competence in III-V compound semiconductors for microelectronics and optoelectronics. It is one of the 58 research institutes of the Fraunhofer-Gesellschaft focused on applied research in government and industrial contracts.

In 2004 the Fraunhofer IAF had a total staff of 191, with 101 scientists and engineers. 142 employees hold permanent positions and 49 have temporary contracts. 13 students from different universities are working on their diploma or doctoral research.

The total floorspace for offices and laboratories is 8 000 m², with a clean room of 800 m² for device and circuit processing technology and epitaxy.

The annual budget (operating costs) in 2004 was € 15.5 million (2003: € 16.2 million), the annual investments were € 5.5 million, compared to € 5.3 million in 2003.

The major part of the operating costs was provided by the Federal Ministry of Defense (BMVg) with 63 % in basic and project funding. 23 % of the operating costs were supplied by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), while 14 % resulted from industrial contracts. Investment in new equipment was again high, the major part of 90 % being funded by BMVg. Industrial contracts amounted to 38 % of our non-military research.

Institutprofil

Das Fraunhofer IAF hat eine langjährige Tradition und ausgewiesene Kompetenz auf dem Gebiet der III-V-Verbindungshalbleiter für Anwendungen in der Mikro- und Optoelektronik. Es ist eines der 58 Institute der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung.

In 2004 hatte das Fraunhofer IAF 191 Beschäftigte, darunter waren 101 Wissenschaftler und Ingenieure. 142 unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter haben Dauerstellen und 49 Zeitverträge. 13 Diplomanden und Doktoranden von verschiedenen Universitäten forschen am IAF.

Die Gesamtfläche der Büros und Laboratorien beträgt 8 000 m², mit einem Reinraum von 800 m² für Prozesstechnologie und Epitaxie.

Die laufenden Kosten lagen 2004 bei 15,5 Mio € gegenüber 16,2 Mio € im Vorjahr. Die Investitionen waren mit 5,5 Mio € etwas höher als 2003 mit 5,3 Mio €.

Der Großteil der laufenden Kosten wurde mit 63 % vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) mit der Grundfinanzierung und in Projekten getragen, 23 % trug das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bei und 14 % resultierten aus Industrienaufträgen. Die Investitionen wurden zu 90 % vom BMVg finanziert. Die Industrienaufträge betragen damit 38 % unserer Vertragsforschung.

Research Areas and Mission

The Fraunhofer IAF is a leading research institution in the field of III-V semiconductors, working on materials, devices, and integrated circuits. Our R&D includes design, manufacture, and small and medium volume production of MMICs, mixed-signal circuits, and optoelectronic devices. We work on practically all III-V materials, using GaAs, InP, and their related compounds, as well as the group-III nitrides and antimonides.

High frequency circuits use modulation-doped field effect transistors and heterojunction bipolar transistors as generic devices. Optoelectronic devices include infrared detectors for the wavelength regions of 3 – 5 μm and 8 – 12 μm using intersubband transitions in AlGaAs quantum well structures or, alternatively, antimonides. We develop GaN-based LEDs and laser diodes for the UV-blue-green spectral range, high-power diode lasers emitting around 1 μm for, e. g., medical applications and material processing, and IR lasers for wavelengths of 2 μm and longer. A further competence of the Institute is the chemical vapor deposition of thick diamond layers with diameters up to 6".

Our defense related research aims at two major applications: radar systems and infrared technology. For radar applications we focus on MMICs, essentially for X- and K-band frequencies with emphasis on GaN for high-power devices, while the second research field is centered on infrared detectors and detector arrays with 640x512 pixels. QWIPs (quantum well IR photodetectors) and antimonide-based heterostructures are the basic building blocks. Newer material developments will include the molecular beam epitaxy of CdHgTe for IR detectors.

Forschungsfelder und Aufgaben

Das Fraunhofer IAF ist ein führendes Forschungsinstitut auf dem Gebiet der III-V-Halbleiter mit Material-, Bauelement- und Schaltungsentwicklung. Unsere FuE-Arbeiten decken alle Prozesse vom Entwurf bis zur Fertigung in kleinen und mittleren Serien ab für eine Vielzahl von MMICs, Mischsignal-Schaltungen und optoelektronischen Bauelementen auf der Basis von GaAs, InP und deren Verbindungen sowie der Gruppe-III-Antimonide und -Nitride.

Unsere Hochfrequenzschaltungen basieren auf modulationsdotierten Feldeffekt-Transistoren und Heterobipolar-Transistoren. An optoelektronischen Bauelementen entwickelt das IAF Infrarotdetektoren für Wellenlängen von 3 – 5 μm und 8 – 12 μm , mit Intersubband-Übergängen in AlGaAs-Quantenfilmen oder mit Antimoniden. Wir arbeiten an kurzwelligen (UV-blau-grün emittierenden) GaN-basierenden LEDs und Laserdioden, Hochleistungsdiodenlasern mit Wellenlängen um 1 μm z. B. für medizinische Anwendungen und Materialbearbeitung sowie an Infrarot-Lasern mit Wellenlängen von 2 μm und länger. Eine weitere Kernkompetenz des Instituts ist die Abscheidung von dicken, großflächigen Diamantscheiben aus der Gasphase mit Durchmesser von bis zu 150 mm.

Die verteidigungsbezogene Forschung beinhaltet einerseits MMICs für X- und K-Band, mit Betonung der GaN-Leistungselektronik für Radarsysteme und andererseits die Entwicklung von IR-Detektoren und Detektorfeldern mit 640x512 Bildpunkten. QWIPs und Antimonid-basierende Übergitter sind die Grundbausteine. Neu aufgenommen in unser Arbeitsprogramm ist die Herstellung von CdHgTe-Schichten mit Molekularstrahlepitaxie.

Commercial applications require analog MMICs, with frequencies of 2 GHz for mobile communication, 20 – 40 GHz for broadband communication systems, 77 GHz for automotive radar systems, and 94 GHz for millimeterwave sensors. Mixed signal circuits for high bitrate telecommunication systems with 80 Gbit/s and higher are also one of our research fields. This basic research, especially funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), includes projects on metamorphic HEMTs and InP-based HBTs, for extended frequency ranges and high bitrates, and on GaN-based electronics for power applications.

We are thus addressing present and future demands of our partners with novel materials, devices, and circuits.

Zivile Anwendungen erfordern analoge MMICs mit Arbeitsfrequenzen von 2 GHz für den Mobilfunk, 20 – 40 GHz für breitbandige Kommunikationssysteme, 77 GHz für Automobilradare und 94 GHz für die Millimeterwellen-Sensorik.

Mischsignalschaltungen für die hochbitratige Nachrichtentechnik mit 80 Gbit/s und mehr sind ein weiteres Forschungsgebiet. Diese grundlegenden Arbeiten, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert, beinhalten Projekte auf der Basis von metamorphen HEMTs und InP-HBTs für höhere Frequenzen und Bitraten sowie GaN-HEMTs für hohe Leistungen.

Das Fraunhofer IAF erfüllt damit gegenwärtige und zukünftige Anforderungen seiner Industriepartner, ob verteidigungsbezogen oder zivil, mit neuen Materialien, Bauelementen und Schaltungen.

Contacts

Kontakte

Director <i>Institutsleiter</i>		Prof. Günter Weimann	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 10 guenter.weimann@iaf.fraunhofer.de
Deputy Director <i>stellv. Institutsleiter</i>		Prof. Peter Koidl	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 50 peter.koidl@iaf.fraunhofer.de
Divisions <i>Abteilungen</i>	Devices and High Frequency Circuits <i>Hochfrequenz-Bauelemente und -Schaltungen</i>	Dr. Michael Schlechtweg	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-5 34 michael.schlechtweg@iaf.fraunhofer.de
	III-V Technology <i>III/V-Technologie</i>	Dr. Michael Mikulla	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-2 67 michael.mikulla@iaf.fraunhofer.de
	Epitaxy <i>Epitaxie</i>	Dr. Martin Walther	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 34 martin.walther@iaf.fraunhofer.de
	Infrared Technology <i>Infrarot-Technologie</i>	Prof. Peter Koidl	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 50 peter.koidl@iaf.fraunhofer.de
	Optoelectronic Materials <i>Optoelektronische Materialien</i>	Prof. Joachim Wagner	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 52 joachim.wagner@iaf.fraunhofer.de
Central Services <i>Zentrale Dienste</i>	Administration <i>Verwaltung</i>	Dr. Beatrix Schwitalla	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 14 beatrix.schwitalla@iaf.fraunhofer.de
	Technical Services <i>Technische Dienste</i>	Dipl.-Ing. (FH) Christa Wolf	Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 28 christa.wolf@iaf.fraunhofer.de

Experts from industry, universities, and the Federal Ministries evaluate the research program of the Institute, advising the Institute's Director and the Board of Directors of the Fraunhofer-Gesellschaft.

The members of our Advisory Board are:

Unser Kuratorium begleitet unsere Forschungsarbeit und berät den Institutsleiter und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft.

Die Mitglieder unseres Kuratoriums aus Industrie, Wissenschaft und Ministerien sind:

Dr. Hans Brugger
EADS Deutschland GmbH, Ulm

Dr. Klaus Schymanietz
EADS Deutschland GmbH, Ulm

Prof. Dr. Hermann Grabert
Universität Freiburg/Br.

Dr. Bernhard Stapp
OSRAM Opto Semiconductors GmbH,
Regensburg

Dipl.-Ing. Karlheinz Kreuzer
Bundesministerium für Bildung und
Forschung (BMBF), Bonn

Prof. Dr. Werner Wiesbeck
Universität Karlsruhe

Prof. Dr. Manfred Pilkuhn
Universität Stuttgart

Dipl.-Math. Hartmut Wolff
Bundesministerium der Verteidigung
(BMVg), Bonn

Dr. Karl Platzöder
Chairman / *Vorsitzender*
Infineon Technologies AG,
München

Dr. Erich Zielinski
Alcatel SEL AG, Stuttgart



Cluster tool of a MBE system.
Transfer-Modul einer MBE-Anlage.

MCT Epitaxy

Materials research for high performance infrared imaging systems has a long tradition at Fraunhofer IAF. Whereas all developments of IR detectors rested on III-V compound semiconductors, a new research project for development of mercury-cadmium-telluride (MCT) IR detectors was granted to the Institute in cooperation with AIM by the Ministry of Defense in July 2004.

The project aims at the fabrication of high quantum efficiency IR detectors for simultaneous detection in two spectral bands, e. g. mid-wavelength infrared (3 – 5 μm) and long-wavelength infrared (8 – 12 μm). Such imaging systems are needed for 3rd generation thermal imaging systems with high frame rates.

For the development of MCT dual-band detectors, Fraunhofer IAF will focus on molecular beam epitaxy (MBE) of MCT and materials characterization. Crystal growth of CdZnTe-substrates, device processing, and fabrication of dual-band FPA camera systems with high quantum efficiency will be conducted by AIM.

Thanks to the research grant by the Federal Ministry of Defense, a new MBE system for MCT was ordered in August 2004. The EpiNeat MBE reactor from RIBER was delivered to the Institute on December 20, 2004, less than five months after placing the purchase order. The new MBE machine will be used for materials research for dual-band MCT detectors as well as to establish a reliable manufacturing process for industrial purposes.

New MBE machine for MCT infrared detectors.
Neue MBE-Anlage für MCT-Infrarot-Detektoren.

MCT-Epitaxie

Materialforschung für leistungsstarke Infrarotkameras hat eine lange Tradition am Fraunhofer IAF. Während alle bisher entwickelten IR-Detektoren auf den III-V-Verbindungshalbleitern basierten, erhielt das Institut im Juli 2004 vom BMVg einen neuen Forschungsauftrag zur Entwicklung von Quecksilber-Cadmium-Tellurid (MCT)-IR-Detektoren, der in Kooperation mit der Firma AIM bearbeitet wird.

Ziel des Projektes ist die Herstellung von IR-Detektoren mit hohem Quantenwirkungsgrad für die zeitgleiche Detektion in zwei Spektralbändern, z. B. im mittleren (3 – 5 μm) und langwelligen Infrarot (8 – 12 μm). Solche Kamerasysteme werden für die Herstellung von Wärmebildkameras der dritten Generation mit hohen Bildwiederholraten benötigt.

Für die Entwicklung von MCT-Dualband-Detektoren liegt der Schwerpunkt der Arbeiten am IAF auf der Molekularstrahlepitaxie von MCT und der Materialcharakterisierung. Die Züchtung der CdZnTe-Substrate, die Bauelementeprozessierung und die Herstellung der Dual-Band-Kamerasysteme erfolgen bei AIM.

Dank der Projektförderung durch das BMVg konnte im August 2004 eine neue MBE-Anlage für MCT bestellt werden. Die von RIBER hergestellte Anlage vom Typ EpiNeat wurde am 20. Dezember 2004 geliefert, weniger als fünf Monate nach Auftragserteilung. Die neue MBE-Anlage wird sowohl für die Materialentwicklung für Dual-Band-MCT-Detektoren als auch für die Erarbeitung eines zuverlässigen Herstellungsprozesses für industrielle Anwendungen verwendet werden.



Visitors at IAF

Out of the many domestic and international visitors coming to the Fraunhofer IAF each year our young visitors will be picked out for this Annual Report, expressing our hope that some of them will find the way back to work at IAF.

In January 2004 a group of 18 high school students, members of a working group of »Freiburg-Seminar« visited Fraunhofer IAF. This seminar, called into life by the Board of Education in Freiburg is part of a program to promote highly talented high school students, especially in mathematics and natural sciences. The keen teenagers were shown through our technology divisions. In March we arranged a practical course for high school students, giving them first impressions for their future education and profession. Eight young people spent a whole week here in different divisions, with practical »hands on« experience. Nikolaus Herres, formerly senior scientist at Fraunhofer IAF, now Professor at the Interstate University of Applied Sciences of Technology, Buchs (CH), visited his former Institute with a group of Swiss students, anxious to learn something about semiconductors and their characterization. More advanced, also in seniority, were six PhD students from the Physics Department of the University of Kaiserslautern who were with us in October.

In having these young people in our Institute and treating them with due respect and usually good lunches, we want to give them a feeling of the scope and the spirit of our research and the transfer into application. We hope to be so convincing to bring back some of them, on students' part time jobs, as diploma and PhD researchers, or, even better, as »grown up« scientists.

Besucher am IAF

Aus den vielen nationalen und internationalen Besuchern, die alljährlich ins Fraunhofer IAF kommen, möchten wir heute unsere ganz jungen Besucher herausgreifen – in der Hoffnung, dass einige später wieder den Weg zu uns finden, um am IAF zu arbeiten.

Im Januar 2004 besuchten uns 18 Schüler der Arbeitsgemeinschaft Physik des Freiburg-Seminars. Dieses Seminar, vom Freiburger Schulamt eingerichtet, ist Teil des Programms zur »Förderung besonders befähigter Schülerinnen und Schüler« in Mathematik und Naturwissenschaften. Die interessierten 16- bis 17-Jährigen wurden durch unsere Technologiebereiche geführt. Ende März veranstalteten wir ein BOGY-Praktikum, ein Praktikum für die Berufs- und Studien-Orientierung an Gymnasien. Acht Schülerinnen und Schüler verbrachten eine ganze Woche im IAF, um sich ein Bild unserer Arbeit zu machen. Diese »Schnupperkurse« wurden teilweise durch praktische Übungen ergänzt. Nikolaus Herres, früher wissenschaftlicher Mitarbeiter am IAF, jetzt Professor an der Interstate-Hochschule für Technik in Buchs (CH), besuchte sein ehemaliges Institut mit einer Studentengruppe, die sich vor allem für die Materialwissenschaft und -charakterisierung interessierte. Fortgeschrittener, weil älter, waren sechs Doktoranden des Fachbereichs Physik der Universität Kaiserslautern, die das IAF im Oktober besuchten.

Wir möchten unseren jungen Besuchern etwas mitgeben von der Vielfalt und den Inhalten unserer angewandten Forschung, aber auch von den Anwendungen. Dabei hoffen wir, dass einige von ihnen später ans IAF kommen, als Werkstudenten, Diplomanden, Doktoranden oder gar als »fertige« Wissenschaftler.



High school students feeling at home in our clean room.
Die »Schulkinder« haben sich schnell an die Hi-Tech-Umgebung gewöhnt.

Diamond Materials GmbH

The low pressure vapor deposition of diamond and the development of novel products made of high quality synthetic diamond have been a successful activity of IAF's material research for many years. Originally starting with basic investigations on microwave plasma deposition and processing technologies of diamond, the scope changed gradually towards the development of novel components and products. In cooperation with many industrial partners a variety of novel applications of CVD diamond was found.

In September 2004 a spin-off company »Diamond Materials GmbH« has been started for the commercial exploitation of the R&D results obtained at Fraunhofer IAF. More information can be found under www.diamond-materials.com. The new company is one of very few suppliers world wide for high purity bulk CVD diamond with properties approaching those of single crystal diamond.

Working in close cooperation with the Institute, the new company will serve the laser industry with highly transparent and thermally stable diamond windows for high-power infrared lasers in the multi kW regime. Other products are diamond windows soldered in UHV flanges for spectroscopic applications, e. g. in synchrotron beamlines. Finally CVD diamond is finding increasing applications in the high end consumer market for high frequency loudspeakers with unsurpassed acoustic properties.

Ausgründung

Die Niederdruckabscheidung von Diamant und die Entwicklung neuartiger Diamantprodukte ist seit langem ein erfolgreiches Geschäftsfeld am Fraunhofer IAF. Standen zu Beginn wissenschaftliche Fragestellungen zur Mikrowellen-Plasmaabscheidung und Materialprozessierung im Vordergrund, so konzentrierten sich die Arbeiten in den letzten Jahren auf die Realisierung neuer Diamantbauteile. In Zusammenarbeit mit industriellen Partnern wurden neue Anwendungen von CVD-Diamant gefunden.

Im September 2004 wurde die Firma »Diamond Materials GmbH« ausgegründet mit dem Ziel, die FuE-Ergebnisse des Institutes wirtschaftlich zu verwerten. Informationen finden sich unter www.diamond-materials.de. Die neue Firma ist einer der weltweit wenigen Produzenten von hochreinem CVD-Diamant in einer Qualität, die der von Diamanteinkristallen gleichkommt.

In enger Zusammenarbeit mit dem Institut stellt Diamond Materials GmbH Komponenten für die Laser-Industrie her. Im Vordergrund stehen hochtransparente und thermisch belastbare Diamantfenster für Hochleistungs-Infrarotlaser mit Leistungen im Multi-Kilowattbereich. Andere Produkte sind in UHV-Flansche eingebaute Diamantoptiken für spektroskopische Anwendungen (z. B. in Synchrotron-Lichtquellen). Schließlich findet CVD-Diamant zunehmend Verwendung im »High-End«-Consumermarkt. So werden Hochfrequenz-Lautsprecher hergestellt mit unübertroffenen akustischen Eigenschaften.



Awards

Three scientific awards were given away to researchers of Fraunhofer IAF in 2004. The Institute is proud of its scientific standing and congratulates the prize winners.

Lutz Kirste was awarded the Carl-Theodor-Kromer-Preis 2004 for his outstanding dissertation »Wachstum und Realstruktur von epitaktischen (Al,Ga)N-Schichten«. The prize is given by the Department of Chemistry, Pharmacy, and Earth Sciences of the Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Auszeichnungen

Drei wissenschaftliche Preise gingen 2004 an Wissenschaftler des Fraunhofer IAF. Das IAF ist stolz auf seine wissenschaftlichen Leistungen und gratuliert den Preisträgern.



Lutz Kirste (vorne, links) erhält den Carl-Theodor-Kromer-Preis für seine hervorragende Dissertation.

Daniel Krausse was the recipient of the GAAS®2004 Prize at the European Microwave Week 2004 in Amsterdam, awarded for one of the three best papers. His paper was on »Robust GaN HEMT Low-Noise Amplifier MMICs for X-Band Applications«.



Daniel Krausse (links) erhält den GAAS®2004-Preis für einen der drei besten Tagungsbeiträge. Ein weiterer Preis ging an Alexandre Bessemoulin (rechts), ehemaliger Mitarbeiter des Fraunhofer IAF.

Günter Weimann received the Heinrich-Hertz-Preis 2004 sponsored jointly by Energie Baden-Württemberg-Stiftung, Karlsruhe, and the Technical University of Karlsruhe. The award was given away in recognition of his work on »Applications and Developments of III-V Semiconductor Structures in Optoelectronics«.



Die an Günter Weimann mit dem Heinrich-Hertz-Preis überreichte Medaille.

IAF's Information Technology

Modern R&D is unthinkable without efficient, reliable, and ubiquitous information technology, i. e. IT is essential for our work. Prerequisites are the availability of state-of-the-art IT services, permanently and with practically no down-times.

To achieve this efficiency a central IT group providing IT solutions for the whole Institute was called into life in August 2001. Our central experts, headed by Jörg Seibel with Thomas Eckermann, Bernhard Landsberg, and Wolfgang Mudrack concentrated the former IT support on department level in a central IT group, not without the distress of some department heads. This reorganization allowed an extensive standardization of the installed hardware and software. A uniform and centralized data storage and a comprehensive back-up policy followed.

Our IT experts, together with two student assistants, cope with a variety of activities, e. g.:

- network design, installation, management and monitoring
- purchasing and installation of hardware
- purchasing, licensing, and installation of standardized software
- maintenance of IT services (internet connection, email, name service, firewall, virus protection)
- representation of the Institute in IT concerns within and outside the Fraunhofer-Gesellschaft
- databank management and server back-up
- administration of the Institute's Windows domain
- support of Unix workstations of our CAD groups

The IT infrastructure backbone consists of a fiber-to-the-desk network with high capacity components.

All in all our IT group supports a total of 250 personal computers, 20 Unix workstations and 180 printers distributed throughout the building. Specialized computers in the clean room and various laboratories demand increased support, compared to the standard office PCs. Ten application servers, providing central functions, have to be looked after, too.

The IT group is set to implement new services, to make things easier for their colleagues in research and administration. One example is the IAF intranet providing various applications, like the reservation of the Institute's cars or, more recently, a standardized user's interface for purchase ordering.

One of the never ending tasks of our IT group is the evaluation of IT innovations and, if viable, their adaptation to our requirements. Of increasing importance is the complete protection of our IT environment against misuse and intrusion from the outside as well as within the Institute. Enhanced IT security is one of the major concerns not only of the IAF, but of the entire Fraunhofer-Gesellschaft.

Last but not least, besides the numerous tasks described here, the group keeps up a reliable and usually friendly support for the every day problems. A helpdesk system serves to collect problems and complaints, which are usually promptly solved.

The IAF's IT experts:
Die zentrale IT-Gruppe:
Wolfgang Mudrack,
Jörg Seibel,
Thomas Eckermann,
Bernhard Landsberg



Die Informationstechnik des IAF

Moderne Forschung ohne funktionierende Informationstechnik (IT) ist heutzutage nicht denkbar. Hohe Verfügbarkeit der notwendigen Dienste sind grundlegende Voraussetzung für die Arbeit der wissenschaftlichen Abteilungen. Im August 2001 wurde deshalb der bis dahin abteilungsweise organisierte IT-Support durch eine zentrale IT-Gruppe ersetzt, nicht nur zur Freude einzelner Abteilungen. Diese zentrale IT-Gruppe betreut das Fraunhofer IAF in allen Belangen der modernen EDV. Durch diese Zentralisierung war eine weitgehende Standardisierung der installierten Hardware sowie der eingesetzten Software-Produkte möglich. Eine einheitliche Datenablage und eine übergreifende Backup-Strategie folgten.

Die zentrale IT-Gruppe, bestehend aus vier Mitarbeitern und 2 studentischen Hilfskräften, bearbeitet u. a. folgende institutsweiten Aufgabengebiete:

- Netzwerkinstallation, -management, -konzeption und -monitoring
- Beschaffung und Auslieferung von PC-Hardware
- Beschaffung, Lizenzierung und Installation von standardisierten Software-Produkten
- Bereitstellung von Diensten (Internetanbindung, E-mail, Name-Service, Firewall, Virenschutz)
- Vertretung des Institutes nach außen in allen IT-Angelegenheiten
- Management einer strukturierten Datenablage und des zugehörigen Daten-Servers mit Backup
- Administration einer institutsweiten Windows-Domäne
- Betreuung des Unix-Pools im CAD-Bereich

Das Rückgrat der IT-Infrastruktur des IAF bildet ein modernes Glasfasernetz (Fiber-to-the-Desk) mit den entsprechenden leistungsfähigen aktiven Netzwerk-Komponenten. Insgesamt werden, verteilt auf die einzelnen Abteilungen, mehr als 250 PCs, 20 Unix-Workstations und 180 Drucker betreut. Neben den Büro-PCs gibt es im Reinraum-Bereich und in den Laborräumen eine Reihe von Rechnern mit Spezialanwendungen, was einen erhöhten Betreuungsaufwand zur Folge hat. Darüber hinaus werden noch zehn Server, welche die zentralen Funktionen institutsweit zur Verfügung stellen, verwaltet.

Die IT-Gruppe ist immer bestrebt, zusätzliche Funktionen, die das Leben für die Anwender vereinfachen, einzubinden. Beispielhaft ist hier das IAF-Intranet, welches neben den vielen schon bekannten Anwendungsmöglichkeiten wie Reservierung von Dienstwagen und Seminarräumen neuerdings auch eine einheitliche Oberfläche für Bestellvorgänge bietet. Auch die Bewertung neuer IT-Verfahren bezüglich des möglichen Einsatzes im Institut sowie die Anpassungen an die Anforderungen des IAF gehören zu den ständigen Aufgaben der IT-Gruppe. Eine zunehmende Herausforderung ist die Absicherung der IT-Umgebung gegen Missbrauch von innen und außen. Die Anhebung des IT-Sicherheitsstandards erfolgt in Abstimmung mit den Bemühungen innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft.

Neben den technischen Funktionen darf die Unterstützung der Nutzer im Alltag nicht vernachlässigt werden. Über ein Helpdesk-System können Probleme und Fehler den IT-Mitarbeitern zur Bearbeitung gemeldet werden, diese werden prompt erledigt.



R&T Management

2004 brought about various changes in the official responsibilities for our research and technology. These were organizational changes in the supervision of the research institutes financed by the Federal Ministry of Defense (BMVg), including Fraunhofer IAF, and personal changes, too.

Hartmut Wolff has, for many years, been responsible for our defense related research program and represented the Ministry of Defense in our Advisory Board. Karl-Heinz Rippert, affiliated with the Federal Office of Defense Technology and Procurement (BWB), supervised our R&T projects.

Hartmut Wolff took up a new position within the Division Rü IV, now being responsible for general aspects of military R&T, as well as international collaborations. He was succeeded by Dieter Teichmann, who was, however, in office only for a short period, to hand over the responsibilities for Fraunhofer IAF to Erwin Bernhard, as of October 1, 2004. He is responsible for our general research program and will replace Hartmut Wolff in our Advisory Board.

Management of research projects has been transferred from BWB to the Technical Centers (Wehrtechnische Dienststellen, WTD). WTD 81 in Greiding is responsible for our technologies in the fields of »Materials and Semiconductor Technologies« and »Sensors«, whereas WTD 91 in Meppen cares for our projects on IR detectors.

A new position, the »Institutsbetreuer« has been created, obviously a person who looks after the Institute and cares for it. Wolfgang Scheidler from WTD 81 is our Institutsbetreuer, also responsible for our relevant technology fields.

Thanks are due to Hartmut Wolff for his staunch support over the years, with encouragement and good advice, also in our Advisory Board. We also thank Karl-Heinz Rippert for his expert project management and support in the past years.

We are looking forward to equally good cooperations with Erwin Bernhard in the definition of our research program, and with our colleagues from the Technical Centers in the projects.

FuT-Planung und Projektbegleitung

2004 gab es wesentliche Veränderungen in der Zuständigkeit und Verantwortung für die Ausrichtung der Forschung und Technologie in den BMVg-grundfinanzierten Instituten, so auch für das Fraunhofer IAF. Es gab organisatorische Veränderungen und persönliche Wechsel.

Die amtsseitige Verantwortung für das Institut lag für viele Jahre bei Hartmut Wolff, dem zuständigen Referatsleiter in der Unterabteilung Rü IV 4 des BMVg und bei Dr. Karl-Heinz Rippert im BWB. Hartmut Wolff war zuständig für unser Forschungsprogramm und im Kuratorium des IAF; Karl-Heinz Rippert war verantwortlich für unsere Technologiefelder und Projektbegleitung.

Hartmut Wolff übernahm das Referat Rü IV 2, er ist der Forschung dort weiterhin verbunden, zuständig für Grundsatzfragen und Strategie. Sein Nachfolger als Institutsverantwortlicher war Dieter Teichmann, der aber nur für kurze Zeit im Amt war. Seit 1. Oktober 2004 wird die fachliche Ausrichtung unserer FuT von Erwin Bernhard, dem Referatsleiter von Rü IV 4 verantwortet.

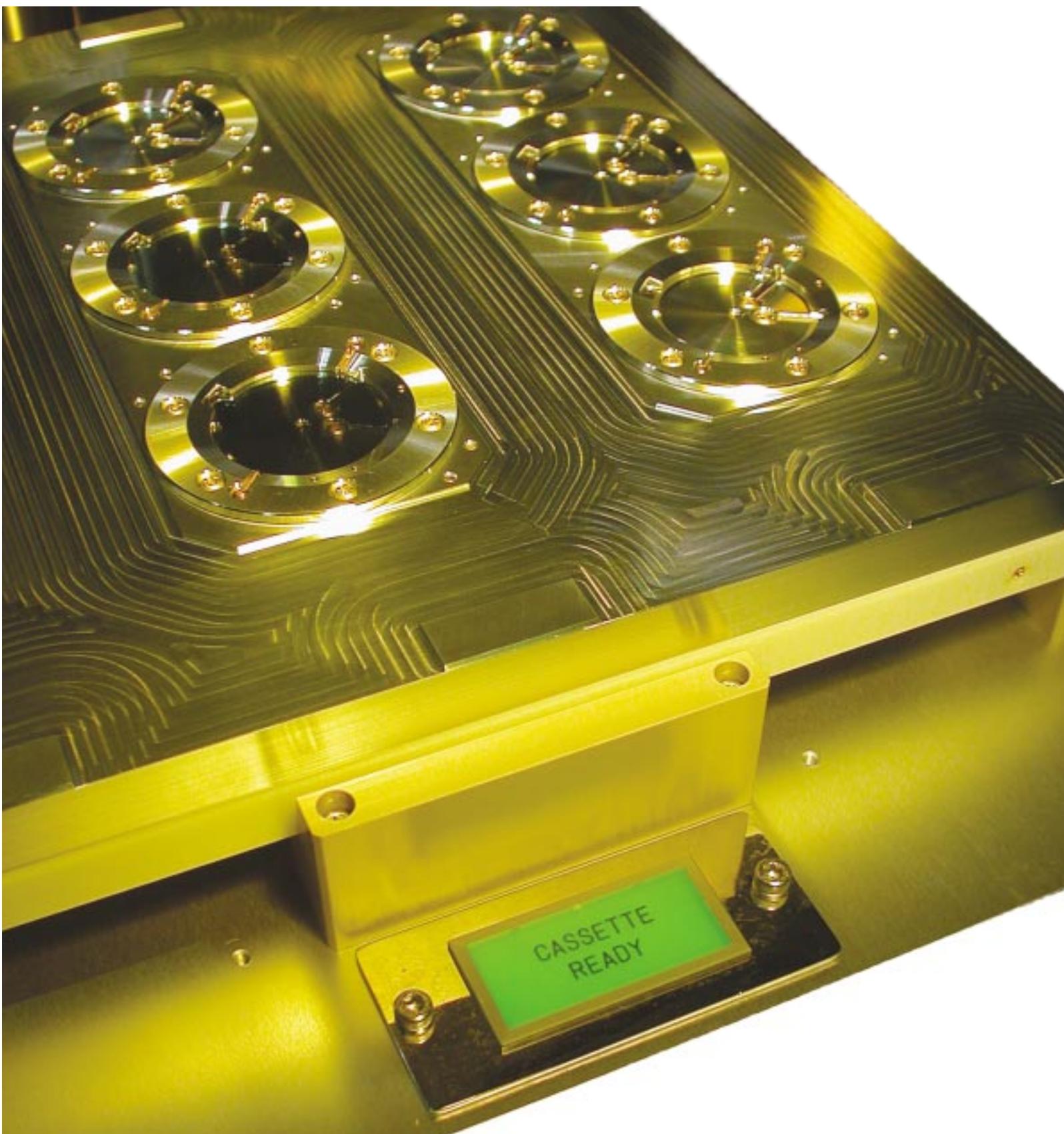
Die Projektbegleitung wurde von BWB auf die Wehrtechnischen Dienststellen (WTD) verlagert, für das Fraunhofer IAF sind dies die WTD 81 in Greiding für die meisten Projekte und die WTD 91 für einige Gebiete der IR-Sensorik.

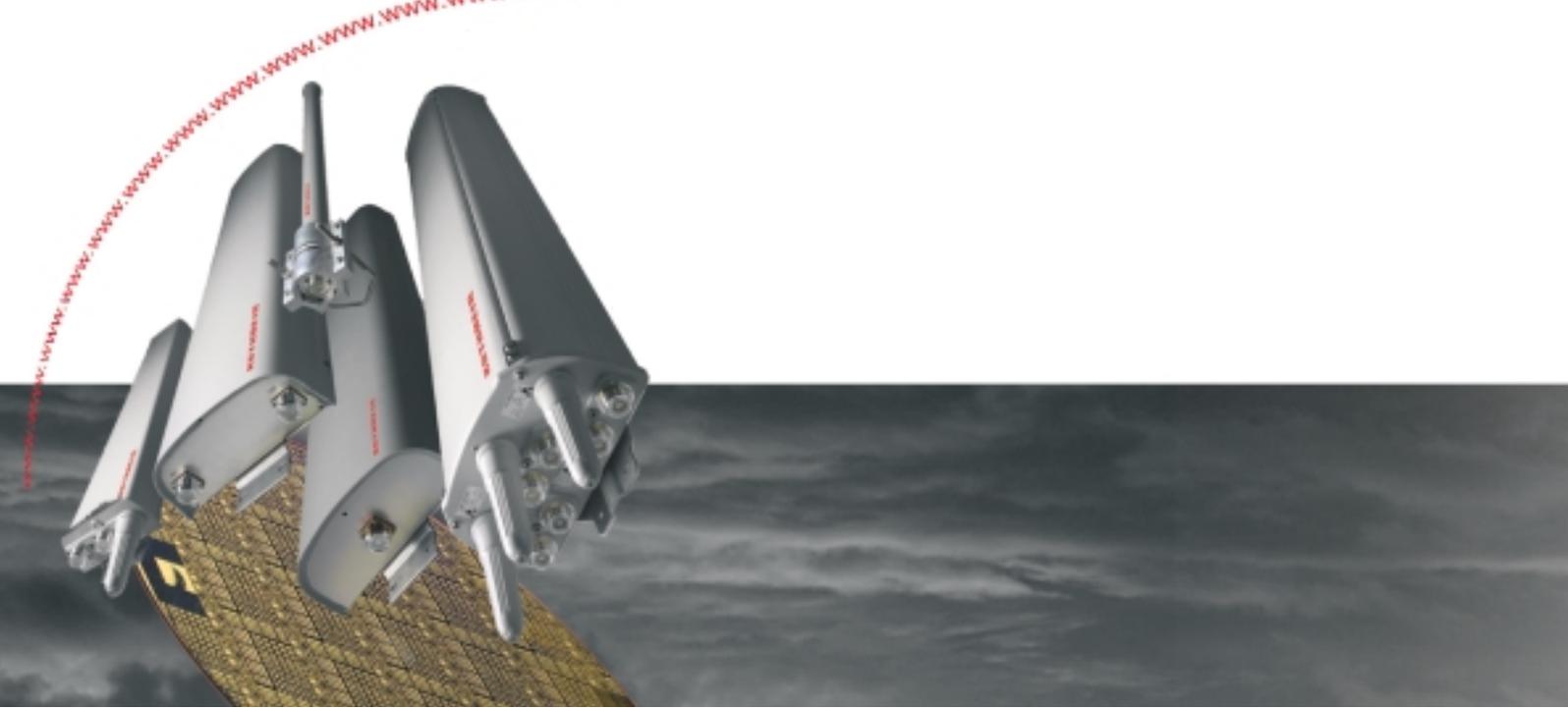
Neu ist die Stelle des Institutsbetreuers, wir werden von Wolfgang Scheidler, WTD 81, betreut. Er ist gleichzeitig Technologiefeld-Verantwortlicher für »Werkstoffe und Technologien für Halbleiter«, in dem viele unserer grundfinanzierten Themen und Projekte untergebracht sind.

Wir danken Hartmut Wolff für seine langjährige Begleitung des Instituts, er hat uns immer unterstützt und gut beraten. Karl-Heinz Rippert hat uns stets geholfen in den Projekten und mit Projektmitteln. Wir sagen ihm Dank dafür.

Wir freuen uns auf gute zukünftige Zusammenarbeit mit unserem neuen Referenten Erwin Bernhard und die bereits gut angelaufene Projektbetreuung durch WTD 81 und WTD 91.

Cassette holding six 2" wafers for loading of e-beam writer.
Kassette für sechs 2"-Wafer zur Beschickung des Elektronenstrahlschreibers.





MMICs

Monolithisch integrierte
Mikrowellen-Schaltungen



Our MMICs or monolithic integrated microwave and millimeter-wave circuits for wireless communication and microwave sensors (radar applications) are based on modulation doped field effect transistors or HEMTs (high electron mobility transistors) in GaAs or InP. (AlGa)N heterostructures are used for high-power applications.

MMICs – oder monolithisch integrierte Mikrowellen- und Millimeterwellenschaltungen – werden für die drahtlose Kommunikation und die Mikrowellensensorik (Radare) entwickelt. Unsere ICs basieren auf modulationsdotierten Feldeffekttransistoren (High Electron Mobility Transistor HEMT) aus GaAs oder InP. Für Leistungsanwendungen verwenden wir (AlGa)N-Heterostrukturen.

Applications

- wireless communication
- phased array radars
- imaging systems
- automotive radars
- ranging and velocity measurement

Anwendungen

- drahtlose Kommunikation
- phasengesteuerte Gruppenantennen (Radare)
- passive bildgebende Systeme
- Kfz-Radare
- Abstandsmessung
- Geschwindigkeitsmessung



Axel Tessmann
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-5 39
axel.tessmann@iaf.fraunhofer.de

Next generation passive and active imaging systems at very high millimeter-wave frequencies are of great interest for security applications, such as the detection of concealed weapons or plastic explosives packages, and the screening of suspicious envelopes or canvas-sided freight vehicles. Remote atmospheric sensing and planetary exploration are further upcoming applications. On the way to explore the lower end of the so-called Terahertz gap (100 GHz to 10 THz) the Fraunhofer IAF has started the development of several monolithic millimeter-wave integrated circuits (MMICs) for operation around 220 GHz, using our well proven 0.1 μm metamorphic HEMT technology.

Additionally, permanent effort was spent in low-loss packaging solutions with excellent millimeter-wave performance. Thus, a set of high performance waveguide-to-microstrip transitions has been realized on 50 μm thin quartz substrates covering the frequency range between 110 GHz and 220 GHz. Fig. 1 shows an assembly photograph of a G-band (140 – 220 GHz) waveguide-to-microstrip transition in back-to-back configuration. For the realization of the probe type transition, we have chosen the longitudinal mounted case, where the surface of the substrate aligns along the direction of propagation of the waveguide. Therefore, the quartz substrate enters the waveguide through a window on the longer side of the waveguide. To simulate the transitions, the high frequency structure simulator HFSS of Ansoft was used. The obtained S-parameters of the G-band transition are shown in Fig. 2. We measured an insertion loss (S_{21}) of approximately 2.9 dB between 140 and 220 GHz for two transitions in back-to-back configuration, leading to an insertion loss of less than 1.5 dB for a single transition. The return loss (S_{11}) is below -12 dB over the entire frequency range with excellent values of less than -16 dB for frequencies beyond 180 GHz.

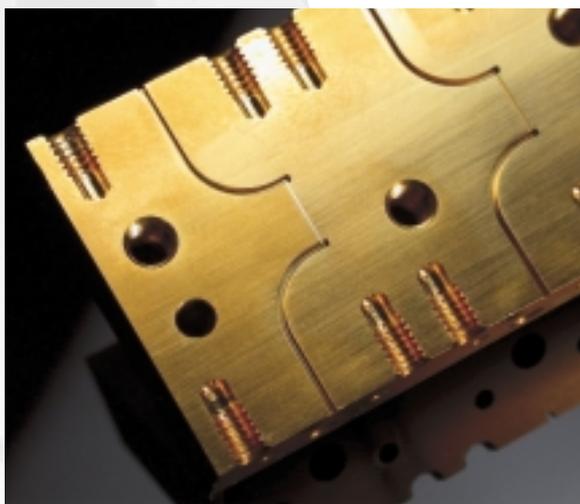


Fig. 1: Assembly photograph of a 140 to 220 GHz waveguide-to-microstrip transition in back-to-back configuration.
Abb. 1: Fotografie des aufgebauten Hohlleiter-zu-Mikrostreifenübergangs für den Frequenzbereich zwischen 140 und 220 GHz.

Hochauflösende aktive und passive, bildgebende Systeme im oberen Millimeterwellen-Frequenzbereich gewinnen zunehmend an Interesse für sicherheitsrelevante Anwendungen wie z. B. der Detektion von versteckt am Körper getragenen Waffen und Sprengstoffen oder dem Durchleuchten von verdächtigen Briefsendungen und Paketen. Weitere Anwendungen liegen in der Untersuchung der Erdatmosphäre sowie der Erforschung und Erkundung ferner Planetensysteme. Um das untere Ende der sogenannten »Terahertz-Lücke« (100 GHz bis 10 THz) zu erschließen, hat das Fraunhofer IAF damit begonnen, unterschiedliche monolithisch integrierte Millimeterwellen-Schaltungen (MMICs) für den Einsatz im Frequenzbereich um 220 GHz zu entwickeln. Zur Realisierung der nachfolgend vorgestellten MMICs wurde auf unsere etablierte metamorphe HEMT-Technologie mit einer Gatelänge von 0,1 μm zurückgegriffen.

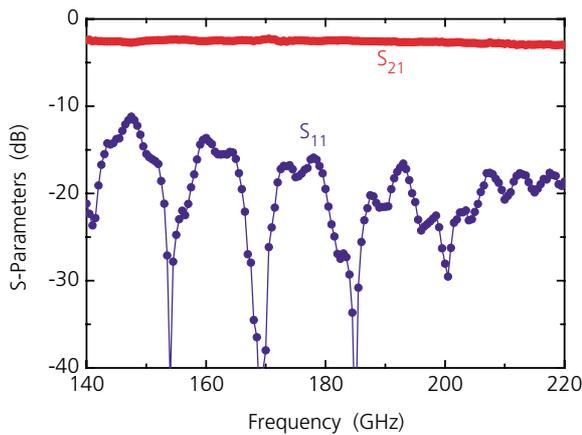


Fig. 2: Measured insertion loss and return loss of a waveguide-to-microstrip transition in back-to-back configuration over the 140 to 220 GHz frequency range.
Abb. 2: Gemessene Streuparameter des Hohlleiter-zu-Mikrostreifenübergangs im Frequenzbereich zwischen 140 und 220 GHz.

Weiterhin wurde die Entwicklung von verlustarmen und reproduzierbaren Aufbautechniken für den Frequenzbereich zwischen 110 und 220 GHz vorangetrieben. Dazu wurde eine Auswahl an Hohlleiter-zu-Mikrostreifenleitungsübergängen entworfen und auf 2,5x2,5 mm^2 großen und lediglich 50 μm dicken Quarzsubstraten hergestellt. In Abb. 1 ist die Fotografie eines in Back-to-back-Anordnung aufgebauten Übergangs für den Frequenzbereich des G-Bands (140 bis 220 GHz) dargestellt. Hierbei erfolgte der Einbau des Übergangs in longitudinaler Richtung, wodurch sich ein Überstand des dünnen Quarzträgers durch ein Fenster auf der breiten Seite des Hohlleiterkanals ergab. Zur Simulation des Hochfrequenzverhaltens der Übergänge wurde das dreidimensionale EM-Simulationsprogramm HFSS von Ansoft benutzt. Die gemessenen Streuparameter des aufgebauten

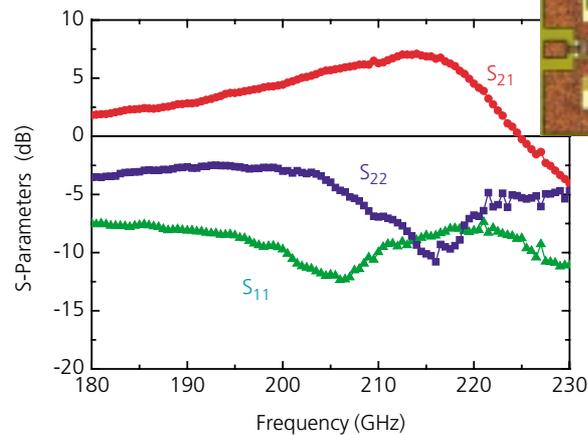
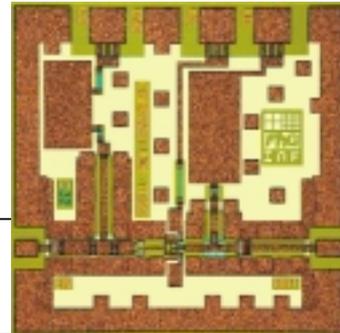


Fig. 3: Chip photograph and on-wafer measured S-parameters of single-stage 220 GHz cascode amplifier MMIC. The chip size is 1x1 mm^2 .
Abb. 3: Chipfoto und on-wafer gemessene Streuparameter des einstufigen 220-GHz-Kaskodenverstärker-MMICs. Die Chipgröße beträgt 1x1 mm^2 .



For the development of a G-band direct detection radiometer, which will be built together with our colleagues from the FGAN-FHR Institute in Wachtberg-Werthhoven, several amplifier MMICs were realized with reasonable bandwidth and low noise figure at 220 GHz. To obtain very high gain-per-stage values, cascode HEMTs have been used, consisting of a series connection of one transistor in common source and one in common gate configuration. The utilized devices have a gate width of $2 \times 15 \mu\text{m}$.

Fig. 3 shows the chip photograph and on-wafer measured S-parameters of a single-stage 220 GHz low-noise amplifier (LNA) MMIC. The compact coplanar layout resulted in a chip size of only $1 \times 1 \text{ mm}^2$. On-wafer S-parameter measurements at G-band were performed using two Oleson WR-5 T/R frequency extension modules.

The single-stage amplifier achieved a linear gain of 5 dB at 220 GHz and a maximum gain of 7 dB at 215 GHz. Additionally, a four-stage amplifier circuit was designed, offering sufficient

gain and bandwidth to be used in high-resolution millimeter-wave transceivers and imagers. Fig. 4 shows a chip photograph of the realized coplanar amplifier MMIC. The monolithic circuit consists of four cascaded single-stage amplifiers including some minor matching modifications to obtain reasonable input and output return losses. The over-all chip size of the four-stage design is $1 \times 2.5 \text{ mm}^2$. On-wafer measured S-parameters are given in Fig 5. A linear gain of approximately 20 dB was obtained at 220 GHz. Between 180 and 225 GHz a small-signal gain of more than 10 dB was achieved. Both, input (S_{11}) and output reflection coefficients (S_{22}) were lower than -10 dB at 220 GHz. Due to the lack of a suitable noise source, the noise figure of the LNA MMIC could not be measured so far. The simulated noise figure, however, is 6.7 dB at 220 GHz. Finally, a four-stage design based on conventional common source devices was realized. This low-noise amplifier MMIC offers a linear gain of more than 15 dB between 190 and 220 GHz as shown in Fig. 6. A detailed chip photograph is illustrated in Fig. 7.

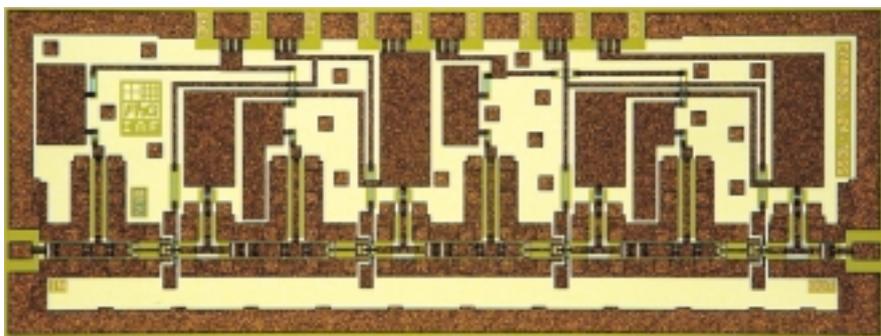


Fig. 4: Chip photograph of four-stage 220 GHz cascode amplifier MMIC. The chip size is $1 \times 2.5 \text{ mm}^2$.
Abb. 4: Chipfoto des vierstufigen 220-GHz-Kaskodenverstärker-MMICs. Die Chipgröße beträgt $1 \times 2,5 \text{ mm}^2$.

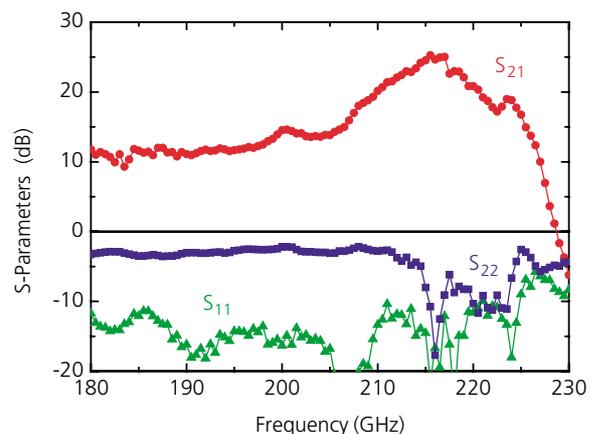


Fig. 5: On-wafer measured S-parameters of four-stage 220 GHz cascode amplifier MMIC.
Abb. 5: On-wafer gemessene Streuparameter des vierstufigen 220-GHz-Kaskodenverstärker-MMICs.

Hohlleiter-zu-Mikrostreifen-zu-Hohlleiter-Übergangs zeigt Abb. 2. Im Frequenzbereich zwischen 140 und 220 GHz wurde eine maximale Einfügedämpfung (S_{21}) von 2,9 dB erzielt, was einer Dämpfung von weniger als 1,5 dB je Einzelübergang entspricht. Der gemessene Reflexionsfaktor (S_{11}) liegt im gesamten, charakterisierten Band unterhalb von -12 dB und erreicht oberhalb von 180 GHz hervorragende Werte von weniger als -16 dB.

Für die Entwicklung eines direkt empfangenden G-Band-Radiometers, welches zusammen mit dem Projektpartner FGAN-FHR in Wachtberg-Werthhoven aufgebaut wird, wurden mehrere rauscharme Verstärker-MMICs mit breitbandigem Verstärkungsverlauf bei 220 GHz entworfen. Um eine hohe Stufenverstärkung zu ermöglichen, wurden Kaskodenbauelemente integriert, die aus einer Serienschaltung von einem Transistor in Sourceschaltung und einem Transistor in Gate-schaltung bestehen. Die Gateweite der verwendeten Bauelemente beträgt $2 \times 15 \mu\text{m}$.

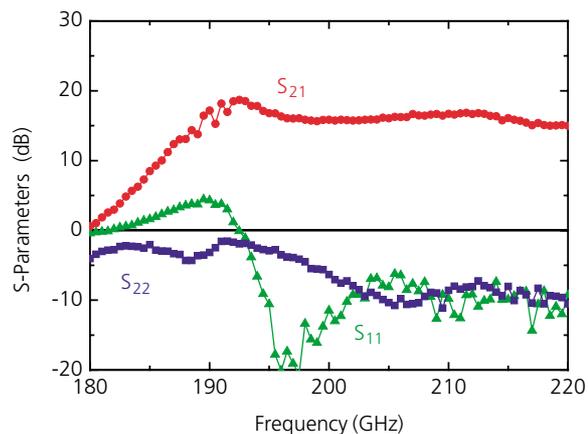


Fig. 6: On-wafer measured S-parameters of four-stage 220 GHz amplifier MMIC.

Abb. 6: On-wafer gemessene Streuparameter des vierstufigen 220-GHz-Verstärker-MMICs.

In Abb. 3 sind die on-wafer gemessenen Streuparameter und das Chipfoto eines einstufigen 220-GHz-Kaskodenverstärker-MMICs dargestellt. Die Größe des kompakten koplanaren Schaltkreises beträgt $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Zur Charakterisierung der rauscharmen G-Band-Verstärkerschaltung wurden zwei Sende- und Empfangsmodule der Firma Oleson eingesetzt. Die gemessene Kleinsignalverstärkung des einstufigen MMICs beträgt 5 dB bei 220 GHz mit einer maximalen Verstärkung von 7 dB bei 215 GHz.

Für den Aufbau eines direkt empfangenden Systemdemonstrators bei 220 GHz wurde ein vierstufiger Kaskodenverstärker mit erhöhter Kleinsignalverstärkung und Bandbreite entworfen. Eine Fotografie des realisierten Verstärker-MMICs ist in Abb. 4 dargestellt. Das Layout der integrierten Schaltung besteht aus vier kaskadierten, einstufigen 220 GHz-Verstärkern. Geringfügige Modifikationen innerhalb der Anpassnetzwerke ermöglichen ein gutes ein- und ausgangsseitiges Stehwellenverhältnis. Die

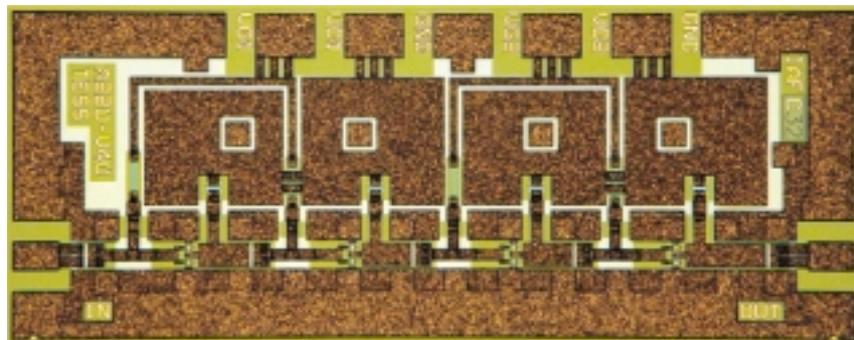


Fig. 7: Chip photograph of four-stage 220 GHz amplifier MMIC. The chip size is $0.65 \times 1.5 \text{ mm}^2$.

Abb. 7: Chipfoto des vierstufigen 220-GHz-Verstärker-MMICs. Die Chipgröße beträgt $0,65 \times 1,5 \text{ mm}^2$.

For signal generation up to 220 GHz a balanced doubler MMIC was realized. The fabricated circuit was designed using a Marchand Balun at the input, which feeds two drain connected FETs as shown in Fig. 8. The balun divides the amplitude of the incoming fundamental signal equally to the two gate matching networks, while the phase difference between the divided signals is 180° . Both transistors are biased close to pinch-off. The major advantage of this layout is, that the fundamental frequencies are cancelled whereas the doubled signals add constructively at the output of the circuit. This keeps the effort for filtering and losses low, which is of major importance for operation at frequencies far above 100 GHz. With this type of monolithic doubler circuit, an output power of more than 1 dBm at an input power of 12 dBm could be

achieved between 180 and 220 GHz. By using 0 dBm as input power, the measured output power was between -7 and -12 dBm as shown in Fig. 8.

To extend the usable frequency range towards Terahertz frequencies, we additionally investigated Schottky diode multipliers, which were driven by monolithically integrated high-power amplifier circuits (HPAs). Today, G-band Schottky diode doublers demonstrate an efficiency of approximately 20 %. This means that to obtain an output power of 20 mW at 220 GHz an input power of about 100 mW is necessary at 110 GHz. For the realization of such high power levels, we developed a set of amplifier MMICs with different power combining structures at the output of the amplifier circuit. Additionally, the number of parallel connected transistors has been varied between two and eight. To obtain 110 GHz HPAs with both, high output power and high gain, metamorphic dual-gate HEMTs with gate lengths of $0.1 \mu\text{m}$ were used.

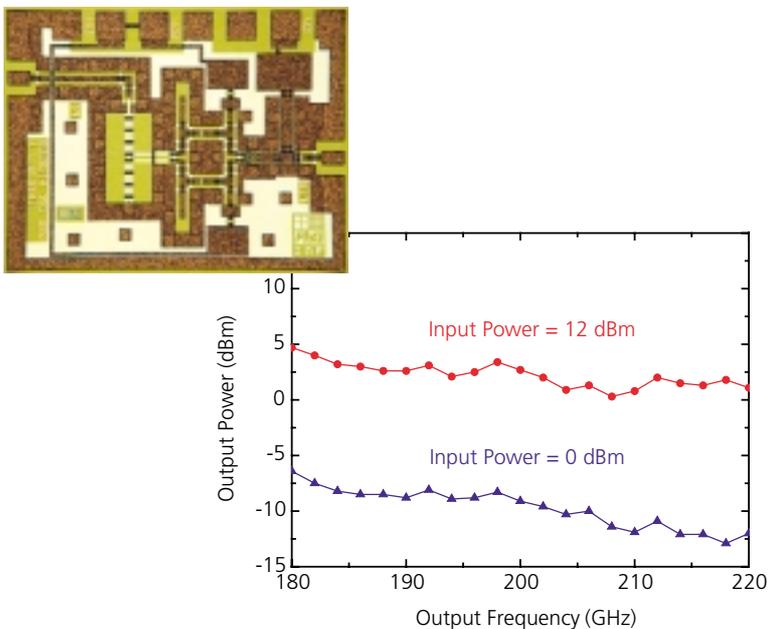


Fig. 8: Chip photograph and measured output power of balanced 150 to 220 GHz frequency doubler MMIC. The chip size is $1 \times 1.25 \text{ mm}^2$.

Abb. 8: Chipfoto und gemessene Ausgangsleistung des balancierten 150 bis 220-GHz-Frequenzverdoppler-MMICs. Die Chipgröße beträgt $1 \times 1,25 \text{ mm}^2$.

Gesamtgröße der Verstärkerschaltung beträgt $1 \times 2,5 \text{ mm}^2$. Die auf dem Halbleiterwafer bestimmten S-Parameter des rauscharmen Kaskodenverstärker-MMICs sind in Abb. 5 dargestellt. Die Schaltung weist eine Kleinsignalverstärkung von 20 dB bei 220 GHz und eine maximale Verstärkung von 26 dB bei 215 GHz auf. Zwischen 180 und 225 GHz wurde eine lineare Verstärkung von über 10 dB gemessen. Die ein- und ausgangsseitigen Anpassungen sind besser als -10 dB bei 220 GHz. Aus Ermangelung einer geeigneten Rauschdiode für 220 GHz konnten noch keine Rauschmessungen an dem G-Band-Verstärker durchgeführt werden. Die simulierte Verstärkerrauschzahl betrug 6,7 dB bei 220 GHz. Neben der oben beschriebenen Ausführung als Kaskodenverstärker wurde zusätzlich eine vierstufige Variante entworfen, die auf konventionellen HEMTs in Sourceschaltung basiert. Dieser Verstärkertyp erzielte eine Kleinsignalverstärkung von über 15 dB im Frequenzbereich zwischen 190 und 220 GHz gemäß Abb. 6. Ein detailliertes Chipfoto der rauscharmen Schaltung ist in Abb. 7 dargestellt.

Zur Erzeugung von hochfrequenten Signalen bei 220 GHz wurde weiterhin ein balancierter Verdopplerschaltkreis entworfen. Die in Abb. 8 gezeigte Schaltung basiert auf einem Marchand Balun, der das eingehende Signal mit einer Phasendifferenz von 180° auf zwei draingekoppelte Transistoren aufteilt. Der Arbeitspunkt beider Transistoren wurde nahe der Abschnürspannung gewählt, um bevorzugt die zweite Harmonische zu generieren. Der hauptsächliche Vorteil des vorgestellten Schaltungskonzepts

liegt in der Auslöschung der fundamentalen Frequenz am Schaltungsausgang, während sich die verdoppelten Signale dort konstruktiv überlagern. Neben geringen Konversionsverlusten ist weiterhin der Aufwand für ein nachträgliches Filtern der Fundamentalfrequenz deutlich reduziert, was insbesondere bei Schaltungen im Frequenzbereich von über 110 GHz einen nicht zu vernachlässigenden Faktor darstellt. Mit diesem monolithischen Verdopplerkonzept konnte im Frequenzbereich zwischen 180 und 220 GHz eine Ausgangsleistung von mehr als 1 dBm für eine Eingangsleistung von 12 dBm bei der fundamentalen Frequenz demonstriert werden. Mit einer reduzierten Eingangsleistung von 0 dBm ergab sich eine Ausgangsleistung zwischen -7 und -12 dB gemäß Abb. 8.

Um den nutzbaren Frequenzbereich noch weiter in Richtung der Terahertz-Region zu verlagern, wurden zusätzlich Vervielfacher auf der Basis von Schottkydioden untersucht, welche mittels monolithisch integrierten Leistungsverstärkerschaltungen (HPAs) gespeist werden. Kommerziell verfügbare Schottkydioden-Verdoppler erreichen heutzutage einen Wirkungsgrad von ungefähr 20 %. Infolgedessen wird zur Erzeugung einer Ausgangsleistung von 20 mW bei 220 GHz eine Eingangsleistung von 100 mW bei 110 GHz benötigt. Zur Realisierung von Leistungspegeln im 100 mW Bereich wurden am Fraunhofer IAF mehrere Verstärker-MMICs entworfen, die unterschiedliche Ausgangsnetzwerke zur Kombination der erzeugten Hochfrequenzleistung beinhalten. Zusätzlich wurde die Anzahl der in Parallelschaltung betriebenen Transistoren am

A chip photograph of a two-stage 110 GHz power amplifier MMIC is shown in Fig. 9. The first stage consists of four four-finger dual-gate transistors connected in parallel, leading to a total gate width of 720 μm , while the output stage has twice this device periphery (1.44 mm). NiCr resistors in the gate bias and isolation resistors between the parallel devices were used to ensure unconditional stability of the amplifier circuit, even at low frequencies. The over-all chip size is only 2x2.25 mm². On-wafer measured S-parameters (Fig. 9) demonstrated a linear gain of approximately 11 dB at 110 GHz by applying a drain voltage of $V_d = 2.6$ V, a second gate voltage of $V_{g2} = 1.1$ V, and a gate voltage of $V_{g1} = -0.2$ V. The total drain current at this bias point was $I_d = 700$ mA (480 mA/mm). Both, input (S_{11}) and output reflection coefficients (S_{22}) were lower than -20 dB at 110 GHz. In Fig. 10 the obtained small-signal gain, output power (P_{out}) and power added efficiency (PAE) of the coplanar HPA circuit is shown. At

110 GHz, we achieved a saturated output power of 20 dBm or 100 mW, a maximum PAE of 4 % and an output power at 1 dB gain compression ($P_{-1\text{dB}}$) of 17.2 dBm or 50 mW. All measurements were performed on-wafer under continuous wave (cw) conditions.

These results clearly show the maturity and the performance of our technology, opening new applications on the electronic side of the Terahertz gap.

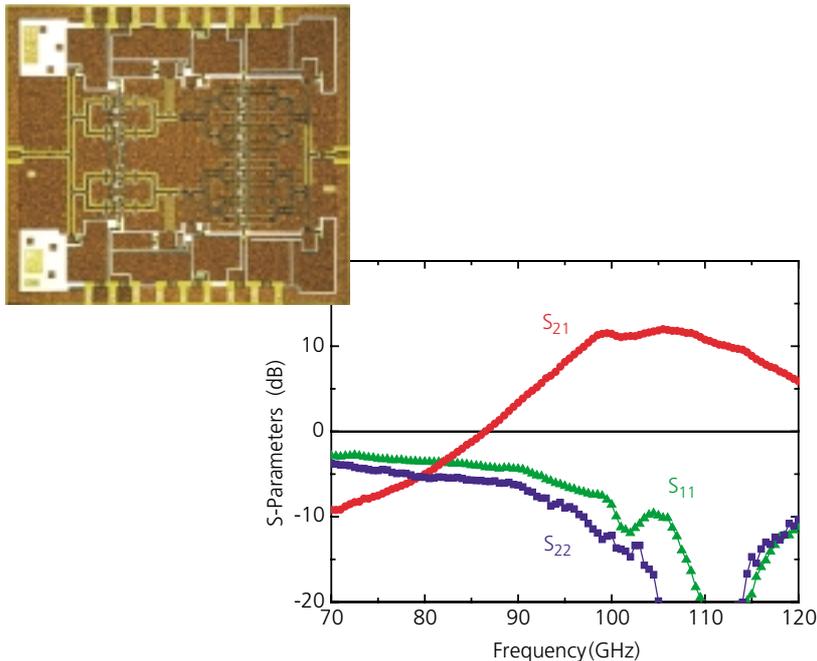


Fig. 9: Chip photograph and on-wafer measured gain and return loss of coplanar two-stage 110 GHz dual-gate HPA. The chip size is 2x2.25 mm².

Abb. 9: Chipfoto und on-wafer gemessene Streuparameter des zweistufigen koplanaren 110-GHz-Leistungsverstärker-MMICs. Die Chipgröße beträgt 2x2,25 mm².

Verstärkerausgang variiert. Die Integration von metamorphen Dual-gate-Transistoren mit einer Gatelänge von $0,1 \mu\text{m}$ ermöglichte hierbei die Realisierung von 110-GHz-Leistungsverstärkern mit hoher Ausgangsleistung bei gleichzeitig hoher linearer Verstärkung.

Die Fotografie eines prozessierten zweistufigen 110-GHz-Leistungsverstärker-MMICs ist in Abb. 9 dargestellt. Die Eingangsstufe der monolithischen Schaltung besteht aus vier in Parallelschaltung betriebenen Dual-gate-Transistoren mit einer Gesamtgateweite von $720 \mu\text{m}$, während die Ausgangsstufe des Verstärkerchips die doppelte Gateweite aufweist ($1,44 \text{ mm}$). Um ein unbedingt stabiles Verhalten der Verstärkerschaltung zu gewährleisten, wurden Nickel-Chrom-Widerstände innerhalb der Spannungszuführung sowie als Isolationswiderstände zwischen den parallel geschalteten Bauelementen vorgesehen. Die Chipgröße des W-Band-Leistungsverstärkers beträgt $2 \times 2,25 \text{ mm}^2$. Die ebenfalls in Abb. 9 dargestellten S-Parameter weisen eine lineare Verstärkung (S_{21}) von 11 dB

bei 110 GHz auf. Zum Betrieb der Schaltung wurden die Versorgungsspannungen $V_d = 2,6 \text{ V}$, $V_{g2} = 1,1 \text{ V}$ und $V_{g1} = -0,2 \text{ V}$ angelegt, was bei einem gemessenen Drainstrom von $I_d = 700 \text{ mA}$ zu einer Gesamtleistungsaufnahme von $1,8 \text{ W}$ führte. Die ein- und ausgangseitigen Anpassungen liegen bei 110 GHz unterhalb von -20 dB . Die Großsignalkenngrößen der koplanaren Verstärkerschaltung beschreibt Abb. 10. Bei der Betriebsfrequenz wurde eine Sättigungsausgangsleistung von 20 dBm oder 100 mW , eine maximale Effizienz von 4% und eine Ausgangsleistung bei 1 dB Verstärkungskompression von $17,2 \text{ dBm}$ oder 50 mW gemessen. Sämtliche Messungen wurden auf dem Halbleiterwafer unter Dauerstrichbedingungen durchgeführt.

Diese hervorragenden Ergebnisse demonstrieren auf eindrucksvolle Art und Weise den Entwicklungsstand und die Leistungsfähigkeit unserer metamorphen HEMT-Technologie, die es ermöglicht, neue Anwendungsgebiete auf der mit elektronischen Bauelementen zugänglichen Seite der Terahertz-Lücke zu erschließen.

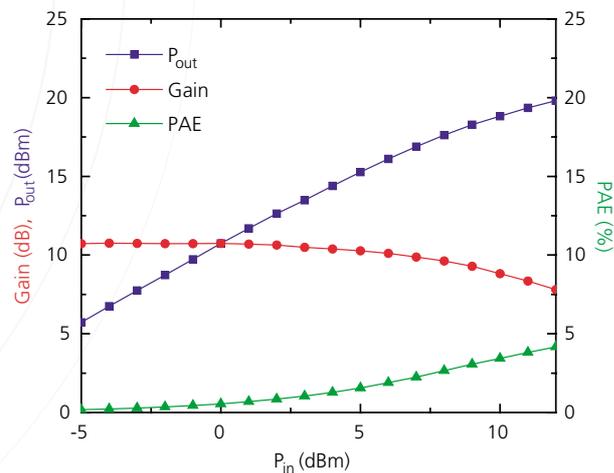


Fig. 10: On-wafer measured power performance of coplanar dual-gate HPA at 110 GHz.

Abb. 10: On-wafer gemessene Leistungsdaten des koplanaren Leistungsverstärker-MMICs bei 110 GHz.



GaN/AlGaN HEMT Microstrip MMICs and Base Station Power Amplifiers

Rüdiger Quay
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-8 43
ruediger.quay@iaf.fraunhofer.de

R&D work on GaN high electron mobility transistors (HEMTs) has entered the phase of industrialization and specific applications. Although there are still technological hurdles to be taken, the prospects of GaN-based devices look promising, with major research programs having been launched, especially in the USA, to increase reliability and yield and to decrease costs. Independent European sources for GaN devices and circuits for applications in defense and communication are, in our opinion, a necessity.

In 2004 we realized first fully integrated amplifier MMICs in microstrip technology with frequencies in X- and K-band for airborne radar and broadband communication systems. In addition, we demonstrated power amplifiers for 3G (and 4G) wireless base stations, focusing on increased bandwidth for, e. g., UMTS services.

We continued our R&D activities in, both, defense related and commercial projects funded by the Federal Ministry of Defense (BMVg), the Federal Office of Defense Technology and Procurement (BWB), and the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in close cooperation with industrial partners and the European Space Agency (ESA). Our key partners include EADS, Ulm, Alcatel-SEL, Stuttgart, United Monolithic Semiconductors (UMS), Ulm, and TNO Safety and Security, The Hague/Netherlands. The close cooperation with the Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH), Berlin, was continued in the BMBF GaN-based initiative »Mobile Internet«.

The epitaxial growth of specific HEMT structures is still a key technology for the successful realization of reliable HEMTs. Using our proven metal organic chemical vapor phase deposition (MOCVD) on SiC substrates for modified layer structures we obtained operation voltages of 42 V and 48 V. Fig. 1 gives the distribution of the on-wafer deviation of the sheet resistance for the total of 161 wafers grown in 2004 on semi-insulating SiC substrates, peaking at a deviation of 1 %. (More than a thousand 2" wafers have been grown on SiC and sapphire since we started working in GaN electronics.)

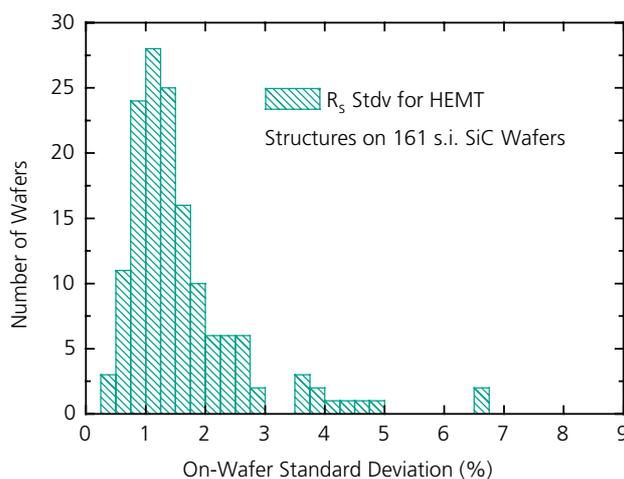


Fig. 1: Histogram of sheet resistance deviation for 161 wafers grown in 2004.
Abb. 1: Histogramm der Standardabweichung des Schichtwiderstands für die 161 Wafer des Jahres 2004.

GaN/AlGaN-HEMT-Mikrostreifen-MMICs und -Leistungsverstärker für Basisstationen

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten an GaN-HEMTs (high electron mobility transistors) haben inzwischen eine Phase der Industrialisierung und der Anwendung erreicht.

Trotz vorhandener technologischer Hürden sind die Aussichten für GaN-basierte Bauelemente und Schaltungen vielversprechend. Große Forschungsprogramme wurden in den USA begonnen, um vorhandene Zuverlässigkeits- und Ausbeuteprobleme zu lösen und Kosten zu senken. Unabhängige europäische Quellen für GaN-Bauelemente und -Schaltungen wie das Fraunhofer IAF sind nach unserer Meinung weiterhin unabkömmlich.

Im Jahr 2004 realisierten wir die ersten vollständig integrierten MMIC-Verstärker in Mikrostreifentechnologie für das X- und K-Frequenzband in Europa für luftgestützte Radar- und breitbandige Kommunikationsanwendungen. Zusätzlich demonstrierten wir hybride Leistungsverstärker für Basisstationen des Mobilfunks der dritten (3G) und vierten (4G) Generation, besonders mit Blick auf extrem breitbandige Anwendungen, z. B. für UMTS-Dienste.

Wie in den Vorjahren wurden unsere Projektaktivitäten finanziert und gefördert durch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie durch unsere Industriepartner und durch die Europäische Weltraumorganisation (ESA). Unsere Schlüsselkunden sind EADS, Ulm, Alcatel-SEL, Stuttgart, United Monolithic Semiconductors (UMS), Ulm, und TNO Security and Safety, Den Haag, Niederlande. Die enge Zusammenarbeit bei den GaN-Aktivitäten mit dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH), Berlin, im BMBF-Innovationsschwerpunkt »Mobiles Internet« wurde erfolgreich fortgesetzt.

Das epitaktische Wachstum spezifischer HEMT-Strukturen ist die notwendige Basistechnologie für die erfolgreiche Realisierung zuverlässiger HEMTs. Mit unserer bewährten metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOCVD, metal organ-

ic chemical vapor phase deposition) auf semi-isolierenden SiC-Substraten erreichten wir mit modifizierten Schichtstrukturen Betriebsspannungen von 42 V und 48 V. Abb. 1 zeigt die Verteilung der »On-wafer«-Standardabweichung des Schichtwiderstandes über die 161 Wafer, die 2004 gewachsen wurden. Die Verteilung hat ihr Maximum bei 1 %. (Über 1000 Zwei-Zoll-Wafer wurden seit Beginn der Arbeiten an der GaN-Elektronik gewachsen.)

Die Prozesstechnologie der Vorderseite erbrachte eine Reduktion der Niederfrequenzdispersion, verbesserte Zuverlässigkeit und einen vereinfachten Prozessablauf, u. a. durch die Verwendung einer neuen Elektronenstrahlolithographie und Reduktion der Kontaktwiderstände.

Der Rückseitenprozess, der 2003 eingeführt wurde, um Mikrostreifen-Kontaktlöcher herzustellen, wurde weiter verbessert, die ersten in Europa erhältlichen MMICs in Mikrostreifentechnik konnten zur Jahresmitte an EADS ausgeliefert werden.

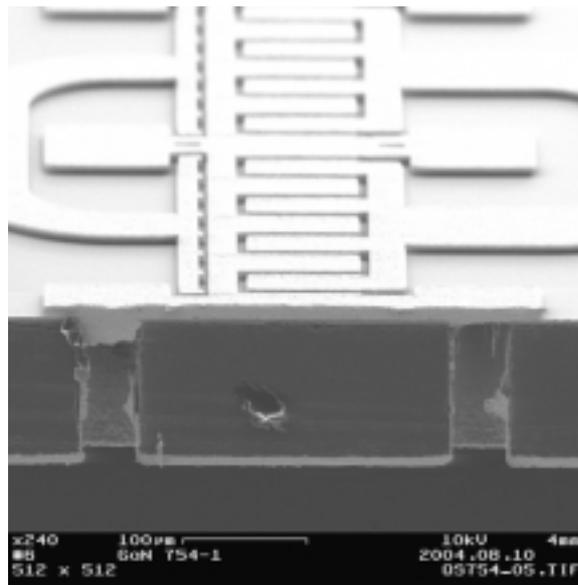


Fig. 2: Cross-section of a fully processed GaN MMIC on SiC in microstrip technology.

Abb. 2: Querschnitt eines vollständig prozessierten GaN-MMICs auf SiC-Substrat in Mikrostreifentechnologie.

Frontside process developments yielded a reduction of low frequency dispersion, improved reliability and facilitated the process flow. These improvements included modified ohmic contacts and the utilization of our new e-beam lithography.

The backside process, focusing on the manufacture of microstrip viaholes in the refractory SiC substrate was started in 2003 and continued in 2004. First European microstrip MMICs were delivered in the middle of the year, in successful cooperation with EADS.

A SEM cross-section of a fully processed MMIC on SiC in microstrip technology is shown in Fig. 2 with a multifinger power amplifier stage. The common ground contact is led through the substrate by gold-plated viaholes. The SiC substrate is thinned down to 100 μm . The viaholes,

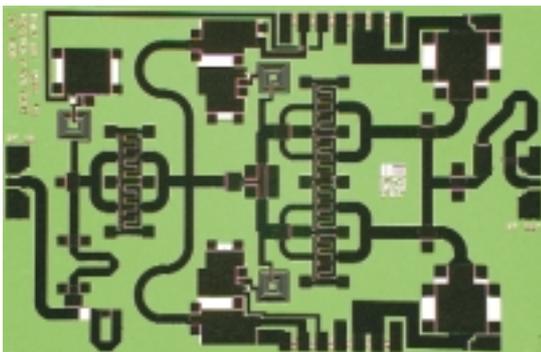


Fig. 3: X-band AlGaN/GaN high-power amplifier in microstrip technology on SiC.
Abb. 3: X-Band-GaN/AlGaN-Hochleistungsverstärker in Mikrostreifentechnologie auf SiC-Substrat.

etched into the SiC from the backside by inductively coupled plasma etching, have a diameter of 50 μm , with very good geometry in respect to RF properties. The etching is continued through the (AlGa)N epitaxial layer to contact the frontside ohmic metal layer. The interconnect resistance from front- to backside shows a low resistance of 15 m Ω with high yield and good homogeneity across the 2" wafers.

Fig. 3 depicts the chip image of a full dual-stage X-band amplifier MMIC in microstrip technology

for use in airborne phased array radar applications. This MMIC was designed and processed at Fraunhofer IAF. The chip size is 4.5x3 mm².

The pulsed large-signal measurements with a duty cycle of 10 % yield a saturated output power of 8.9 W and more than 18 dB linear gain at 8.5 GHz and an operating voltage of 31 V (Fig. 4). Similar amplifiers have been delivered to our industrial partner for integration into transmit receive modules (TRX).

Using newer coplanar designs, dual-stage X-band amplifier MMICs have been realized with an output power of 13.4 W at 10 GHz and a linear gain of 20 dB in pulsed radar operation at 35 V operational bias, again with a duty cycle of 10 %. Currently measured power added efficiencies amount to 25 %.

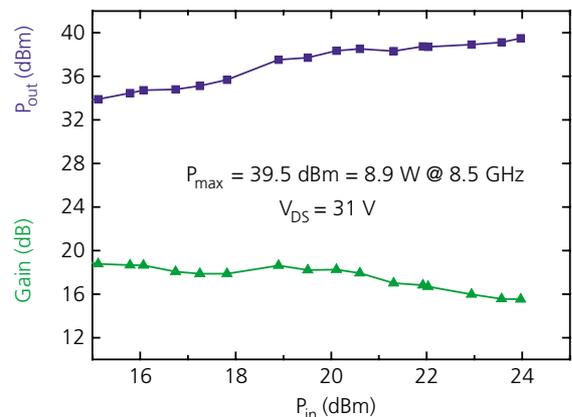


Fig. 4: Output power and gain of microstrip high-power amplifier.
Abb. 4: Ausgangsleistung und Verstärkung eines Mikrostreifenverstärkers.

Fig. 5 gives the large-signal measurement for a pulse width of 100 μs . These devices also showed very good relative bandwidths of more than 10 % in X-band.

Broadband (AlGa)N microstrip amplifiers with high linearity for wireless communication between base stations have been developed together with EADS. The short gate lengths of 150 nm were fabricated with e-beam lithography. The chip image of a K-band high-power amplifier is shown in Fig. 6.

Die REM-Querschnittsaufnahme der Multifinger-Leistungsendstufe eines MMICs auf SiC in Mikrostreifentechnologie wird in Abb. 2 gezeigt. Der Massekontakt wird mit Goldkontakten durch Löcher im Substrat geführt. Das Substrat wird dazu auf 100 μm gedünnt. Die Kontaktlöcher werden mit ICP-Ätzung (inductively coupled plasma) durch das SiC geätzt. Sie haben einen Durchmesser von 50 μm . Die entstehende Geometrie liefert sehr gute HF-Eigenschaften. Die Ätzung wird fortgesetzt durch die epitaktischen (AlGa)N-Schichten bis zur vorderseitigen Ohmkontaktschicht. Der Widerstand von Vorder- zu Rückseite beträgt 15 $\text{m}\Omega$, mit hoher Ausbeute und guter Homogenität über den 2"-Wafer.

Abb. 3 zeigt einen zweistufigen X-Bandverstärker-MMIC in Mikrostreifentechnologie für die Anwendung in luftgestützten phasengesteuerten

Mit neueren koplanaren Schaltungsentwürfen wurden zweistufige X-Band-Verstärker realisiert, die eine Ausgangsleistung von 13,4 W bei 10 GHz und eine lineare Verstärkung von 20 dB im gepulsten Radarbetrieb bei 35 V Betriebsspannung erreichen, wiederum gemessen mit einem Tastverhältnis von 10 %. Der maximale Wirkungsgrad der Schaltung beträgt gegenwärtig 25 %. Abb. 5 zeigt die Großsignalmessung für eine Pulsdauer von 100 μs . Diese Bauelemente zeigten eine große relative Bandbreite von mehr als 10 % im X-Band.

Breitbandige (AlGa)N-Verstärker in Mikrostreifenleitungstechnik mit hoher Linearität für Richtfunkstrecken zwischen Basisstationen des Mobilfunks wurden gemeinsam mit EADS entwickelt. Die kurzen Gatelängen von 150 nm wurden mit Elektronenstrahlolithographie definiert. Der K-Band-Leistungsverstärker wird in Abb. 6 gezeigt.

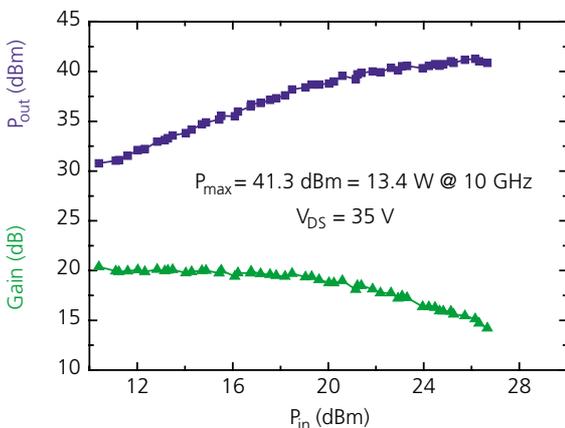


Fig. 5: Output power and gain measurement of coplanar X-band high-power amplifier.

Abb. 5: Ausgangsleistung und Verstärkung eines koplanaren Verstärkers.

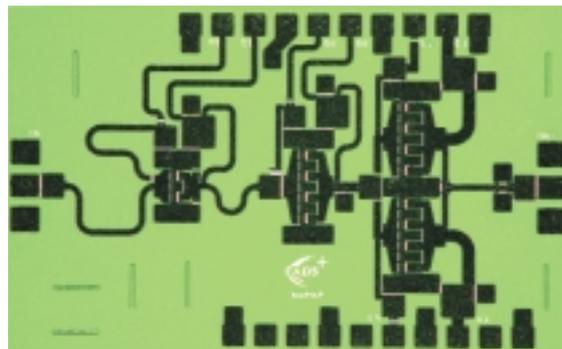


Fig. 6: K-band AlGaN/GaN high-power amplifier in microstrip technology with $l_g = 150$ nm.

Abb. 6: K-Band-GaN/AlGaN-Leistungsverstärker in Mikrostreifentechnologie mit $l_g = 150$ nm.

Antennen. Dieser MMIC wurde am Fraunhofer IAF entworfen und hergestellt. Die Größe der Schaltung beträgt 4,5x3 mm^2 .

DC- und HF-gepulste Großsignalmessungen mit einem Tastverhältnis von 10 % ergeben eine Ausgangsleistung in der Sättigung von 8,9 W und > 18 dB lineare Verstärkung bei 8,5 GHz und einer gepulsten Betriebsspannung von 31 V (Abb. 4). Ähnliche Verstärker wurden an unseren Industriepartnern für die Integration in Sende-/Empfangs-Module geliefert.

Die gemessenen Streuparameter dieses Verstärkers für den Breitbandbetrieb zwischen 15 GHz und 25 GHz, also fast das gesamte K-Frequenzband, werden in Abb. 8 gezeigt.

Eine vielversprechende zivile Anwendung der GaN-HEMTs sind Basisstationen des Mobilfunks. Diese erfordern hohe Ausgangsleistungen und hohe Wirkungsgrade sowie niedrige Verzerrungen für moderne Modulationsverfahren. Für die Kommunikation zwischen Basisstation und

Fig. 8 shows the S-parameters for broadband operation between 15 GHz and 25 GHz, so covering almost the full K-band.

One of the most promising non-military applications of GaN-based HEMTs will be in wireless base stations with base station systems demanding high power, high efficiency, and low distortion for modern modulation schemes. For communication between base station and cellphone excellent results have been shown in Japan, exceeding the silicon LDMOS performance.

Fig. 7 depicts a single-stage power amplifier in hybrid technology for the frequency band between 1.8 GHz and 2.7 GHz. The circuit uses two GaN/AlGaIn HEMT bars in parallel with an overall gate width of 16 mm. Such devices were packaged at Fraunhofer IAF into standard LDMOS housings including thermal management and oscillation suppression for broadband devices.

In a similar demonstrator with our packaged HEMTs as shown in Fig. 7, our partner Alcatel-SEL measured a peak output power of 35 W at 2.2 GHz and more than 10 W in the range between 1.8 and 2.5 GHz. The linear gain

exceeded 20 dB within the full band, measured with a UMTS test signal. These results demonstrate the outstanding broadband power capabilities under realistic operation.

The demonstrators are currently being investigated with respect to trade-off between linearity and output power, with the goal of replacing LDMOS silicon transistors for high bandwidth (relative bandwidth higher than 20 %) applications required in 3G and 4G mobile communication systems.

Device and circuit reliability is a major concern for all applications. Here further progress is essential, we are concentrating on the stabilization of our process technology. Fig. 9 shows the first results of these efforts, giving the relative change in drain current of 19 GaN/AlGaIn HEMTs on SiC operated for more than 400 h at a bias of 20 V and a substrate temperature of 200 °C in ambient air. The DC power density is 5 W/mm leading to a channel temperature of 275 °C. The visible degradation reveals a stabilization for all devices within a margin of 20 %, which is still unsatisfactory, however.

In 2005 we will concentrate our process stabilization to increase reliability and device lifetime. Additionally we will convert our multiwafer MOCVD reactor to accommodate 3" substrates, another step to cost effective device manufacture compatible with industry.

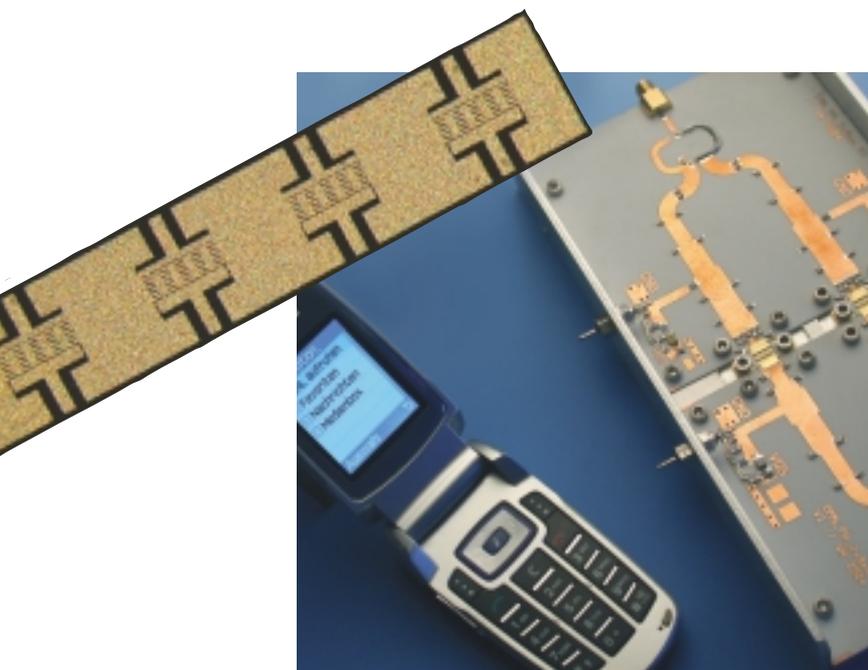


Fig. 7: Single-stage power amplifier for base stations operating in the 1.8 GHz to 2.7 GHz range. Diced GaN/AlGaIn HEMT bar used in the demonstrator has a total gate width of 8 mm.

Abb. 7: Einstufiger Leistungsverstärker für Basisstationen für 1,8 GHz bis 2,7 GHz. Der vereinzelte HEMT-Barren im Demonstrator hat eine gesamte Gateweite von 8 mm.

Mobiltelefon wurden dazu in Japan exzellente Resultate erzielt, welche die Leistungsfähigkeit von LDMOS-Transistoren übertreffen.

Abb. 7 zeigt einen einstufigen hybriden Verstärker für das Frequenzband zwischen 1,8 GHz und 2,7 GHz. Der Verstärker nutzt zwei parallele GaN/AlGaIn-HEMT-Zellen mit einer Gesamtgateweite von 16 mm. Die Bauelemente wurden am Fraunhofer IAF in LDMOS-Gehäuse eingebaut mit Unterdrückung von parasitären HF-Schwingungen und guter Wärmeabfuhr.

In einem ähnlichen Aufbau wurden von unserem Projektpartner Alcatel-SEL eine Spitzenausgangsleistung von 35 W bei 2,2 GHz und über 10 W im Frequenzbereich zwischen 1,8 GHz und 2,5 GHz gemessen. Die Messung erfolgte unter realistischen Bedingungen mit einem UMTS-Testsignal, um die Linearität nachzuweisen, die lineare Verstärkung betrug 20 dB. Die GaN-Verstärker weisen hervorragende Breitbandigkeit auf.

Die Demonstratoren werden gegenwärtig ausgewertet, um Linearität und Ausgangsleistung abzugleichen mit dem Ziel, LDMOS-Transistoren

zu ersetzen für Anwendungen mit hohen relativen Bandbreiten von über 20% in Kommunikationssystemen der dritten und vierten Generation. Die Zuverlässigkeit der Bauelemente und Schaltungen ist von fundamentaler Bedeutung für alle Anwendungen. Hier ist weiterer Fortschritt notwendig, wir konzentrieren uns auf die Stabilisierung unserer Technologie. Abb. 9 zeigt erste Resultate dieser Bemühungen. Die relative Veränderung des Drainstroms von 19 GaN/AlGaIn-HEMTs auf SiC-Substrat wird dargestellt über eine Betriebsdauer von 400 h. Die Betriebsspannung beträgt 20 V bei einer Substrattemperatur von 200 °C. Die Alterungen wurden an Luft durchgeführt. Die DC-Leistungsdichte beträgt 5 W/mm, woraus eine Kanaltemperatur von 275 °C resultiert. Die sichtbare Degradation zeigt eine Stabilisierung innerhalb einer Marge von 20 %, dieses Ergebnis ist noch nicht zufriedenstellend.

2005 werden wir uns auf die Stabilisierung der Prozesstechnologie im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer konzentrieren. Wir werden ferner unsere Technologie auf 3"-Substrate umstellen, um kostengünstiger und industriekompatibel zu werden.

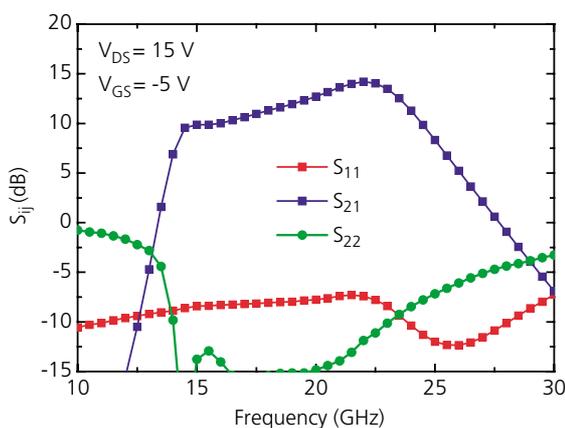


Fig. 8: S-parameters of K-band AlGaIn/GaN HEMT broadband amplifier in microstrip technology.
Abb. 8: S-Parameter des K-Band-GaN/AlGaIn-HEMT-Breitbandverstärkers in Mikrostreifentechnologie.

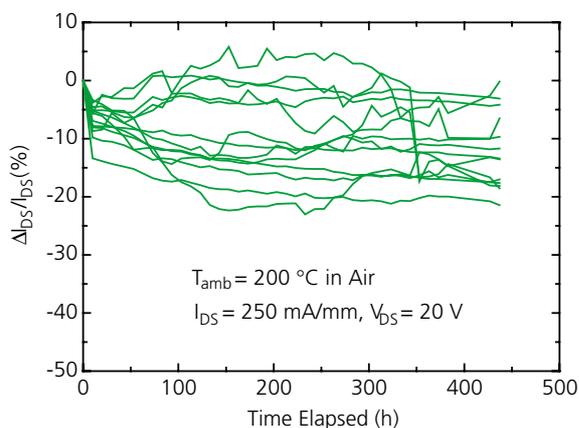
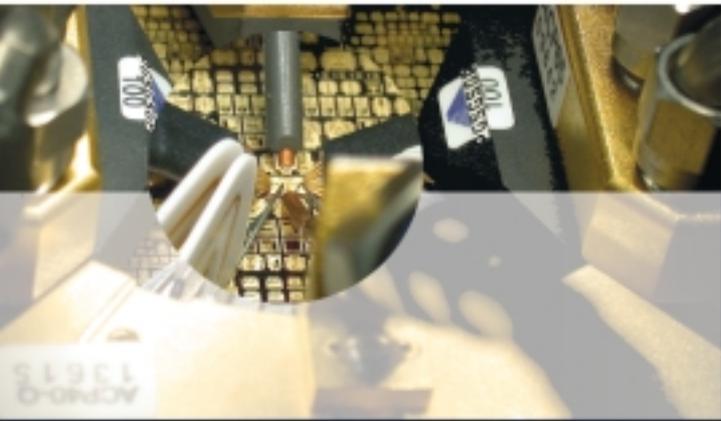


Fig. 9: Relative change of drain current as function of operational time in accelerated tests at 200 °C.
Abb. 9: Normierte Änderung des Drainstroms als Funktion der Betriebszeit in beschleunigten Alterungstests bei 200 °C.



MIXICs

Mischsignal-Schaltungen



We develop mixed signal and multi-functional ICs for highest bitrates up to 80 Gbit/s using our well-established GaAs HEMT-technology. A complementary InP-based heterobipolar transistor (HBT) technology is available, too. ICs with a complexity of several 100 transistors are available and can be mounted and packaged in modules.

Wir stellen Mischsignal- und multifunktionale ICs für Datenraten bis 80 Gbit/s mit unserer bewährten GaAs-basierenden HEMT-Technologie her. Diese wird durch eine InP-Heterobipolar-Transistor (HBT)-Technologie ergänzt. Die Schaltungen mit bis zu einigen 100 Transistoren werden als Prototypen oder in Kleinserien hergestellt, wobei auch die Aufbau- und Gehäusetechnik vorhanden sind.

Applications

- optical communication with bitrates up to 80 Gbit/s
- test and measuring systems
- parallel optical links

Anwendungen

- ICs für die optische Nachrichtentechnik bis 80 Gbit/s
- Mess- und Testsysteme für hohe Bitraten
- parallele optische Verbindungen



InP DHBT-Based Mixed-Signal Integrated Circuits for ≥ 80 Gbit/s Data Transmission

Rachid Driad
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-6 37
rachid.driad@iaf.fraunhofer.de

High-speed mixed-signal integrated circuits (ICs) are important building blocks for the development of future ETDM (electrical time domain multiplexing) fibre-optic transmission systems, for long-haul and metro network applications.

A wide range of materials and device structures, including InP and SiGe HBTs (heterojunction bipolar transistor), GaAs and InP HEMTs (high electron mobility transistor), are being evaluated for the development of ICs for 80 Gbit/s and beyond. The maximum operating speed being comparable for all technologies, benchmark ICs achieving these data rates have already been demonstrated, using any of the above-mentioned technologies.

Thanks to their excellent high-frequency performance, high breakdown voltage and their ability to be monolithically integrated with $1.5 \mu\text{m}$ optoelectronic devices, InP-based HBTs are expected to be »prime« contenders for making future high bit-rate transmitters and receivers. The modulator driver on the transmitting side has been identified as one of the most challenging key components in these systems, because of the simultaneous requirements of high-voltage swing and high operating speed.

At Fraunhofer IAF, we have recently developed an InP-DHBT technology, starting from epitaxial growth to complete IC manufacturing. Several types of mixed-signal ICs for 80 Gbit/s ETDM, including broadband amplifiers, voltage controlled oscillators (VCOs), frequency dividers, and multiplexers/demultiplexers have been successfully demonstrated. The present report describes the current status of our device technology, as well as main achievements in circuit development.

We quickly brought our process to the international state-of-the-art with respect to yield, parameter uniformity, and highest cut-off frequencies. Figs. 1 and 2 show convincingly the quality of our technology, with extremely low variations in DC current gain and threshold voltage measured across a 3" wafer as well as high cut-off frequencies.

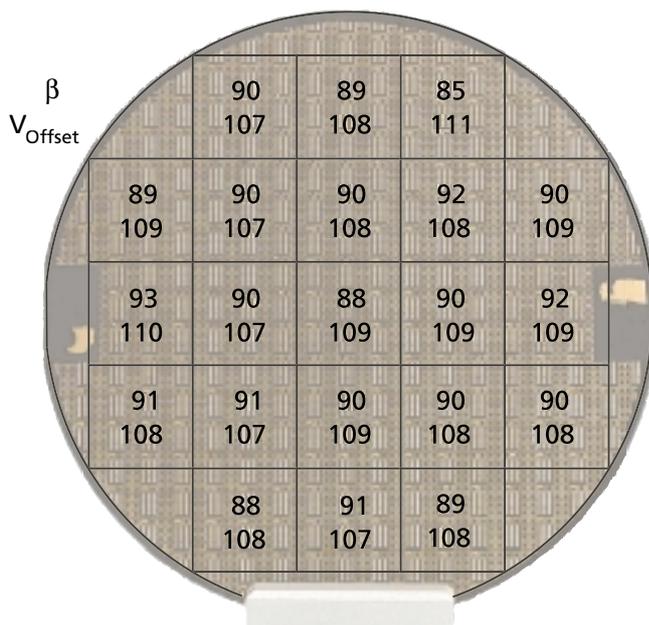


Fig. 1: Distribution of current gain (β) and offset voltage (V_{Offset}) across 3" wafer.
Abb. 1: Verteilung der Stromverstärkung (β) und der Einsatzspannung über 3"-Wafer.

InP-DHBT-Mischsignalschaltungen für 80 Gbit/s und darüber

Schnelle Mischsignalschaltungen sind Schlüsselkomponenten für zukünftige Zeitmultiplex-Systeme (electrical time domain multiplex, ETDM) in der optischen Nachrichtenübertragung im Weitverkehr und in Metro-Netzen.

In der Entwicklung von integrierten Schaltungen für Datenraten von 80 Gbit/s und darüber werden gegenwärtig eine Reihe von Materialien und Bauelementen, wie InP- und SiGe-HBTs (heterojunction bipolar transistors) oder GaAs- und InP-HEMTs (high electron mobility transistors), untersucht. Für alle diese Technologien konnten Schaltungen mit vergleichbaren hohen Arbeitsgeschwindigkeiten demonstriert werden.

Dank ihrer ausgezeichneten Grenzfrequenzen, ihrer hohen Durchbruchspannung und der Möglichkeit der monolithischen Integration mit optoelektronischen Komponenten im Wellenlängenbereich um $1,5 \mu\text{m}$ werden InP-basierende HBTs als erste Wahl für die Realisierung von hochbitratigen Sende- und Empfangsmodulen angesehen. Der Modulatortreiber auf der Sendeseite wird dabei als die anspruchsvollste Schaltung für 80 Gbit/s und darüber angesehen, weil gleichzeitig hohe Taktraten und große Spannungshübe gefordert werden.

Am Fraunhofer IAF wurde eine InP-DHBT-Technologie entwickelt, die vom epitaktischen Wachstum bis zur Herstellung von kompletten integrierten Schaltungen (ICs) reicht. Verschiedene Mischsignal-Schaltungen für 80 Gbit/s-ETDM-Systeme, wie breitbandige Verstärker, spannungsgesteuerte Oszillatoren (VCOs), Frequenzteiler sowie Multiplexer und Demultiplexer wurden mit Erfolg realisiert. Dieser Bericht beschreibt den aktuellen Stand unserer Technologie und wesentliche Eigenschaften unserer integrierten Schaltungen.

Der IAF-eigene Prozess musste in kurzer Zeit an den heutigen internationalen Stand der Technik heranführen, um hohe Ausbeuten und geringe Variation der Bauelementeparameter einerseits und höchste Grenzfrequenzen andererseits zu liefern. Abb. 1 und Abb. 2 zeigen, dass dies gelungen ist. Die geringen Schwankungen von

Gleichstromverstärkung und Schwellenspannung, gemessen über einem $3''$ -Wafer, sind ebenso überzeugend wie die gemessenen hohen Grenzfrequenzen.

DHBT-Schichtstrukturen wurden in einer Mehrscheiben-Molekularstrahlepitaxie-Anlage (Veeco GEN-200) mit fester Phosphorquelle hergestellt. Diese Strukturen beinhalten 30 nm dünne, gradierte, mit Kohlenstoff dotierte Basisschichten aus InGaAs und gradierte Kollektorschichten aus InGaAs(P)/InP. Die dünne Basis dient der Verringerung der Basis-Transitzeiten. Die damit einhergehende Vergrößerung des Basis-Widerstands wurde kompensiert durch die Erhöhung der Kohlenstoff-Dotierung der Basis auf $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Dies resultierte in einem Basis-Schichtwiderstand von etwa $800 \Omega/\square$.

Der Herstellungsprozess der InP-DHBT-Schaltungen basiert auf selbstjustierenden Basis-Emitter-Kontakten und selektivem nass-chemischen Ätzen. Für die Bauelementpassivierung und die Planarisierung wird Benzocyclobuthen (BCB) verwendet. Die IC-Prozesstechnik beinhaltet ferner NiCr-Widerstände, Dünnschicht-MIM-Kondensatoren und eine Au-basierende Dreilagmetallisierung.

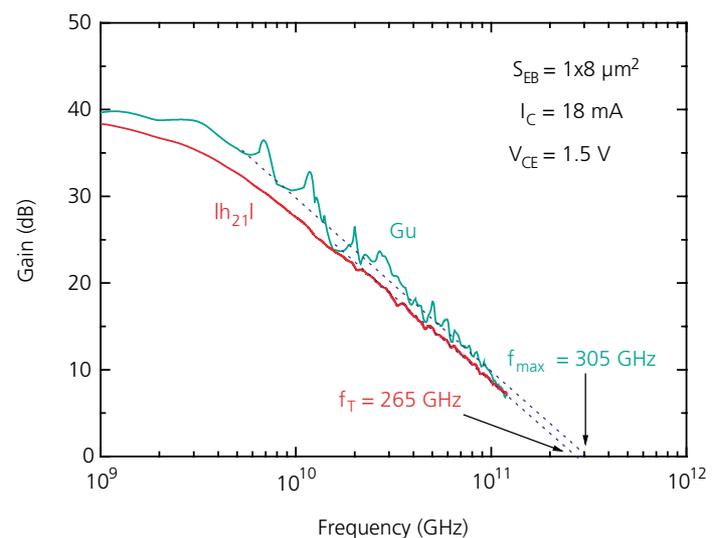


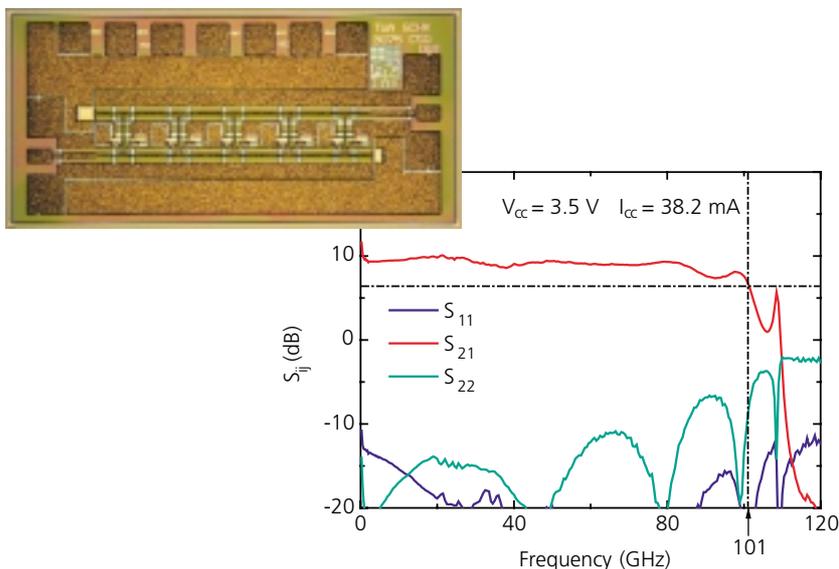
Fig. 2: Rf-properties of $1 \times 8 \mu\text{m}^2$ InGaAs/InP DHBT.

Abb. 2: HF-Eigenschaften eines InGaAs/InP-DHBTs mit den Dimensionen $1 \times 8 \mu\text{m}^2$.

The DHBT layer structures were grown in a multiwafer solid phosphorus molecular beam epitaxy system (Veeco GEN-200). These structures included a thin graded carbon-doped InGaAs base and an InGaAs(P)/InP graded collector. The 30 nm wide base has been implemented to reduce the base transit time. The subsequent increase of the base sheet resistance was compensated by an increase of the carbon doping level to $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, resulting in a base sheet resistance of $\sim 800 \text{ } \Omega/\text{square}$.

The fabrication process of the InP DHBT-based ICs is based on self-aligned base-emitter contacts and selective wet chemical etching. Benzocyclobutene (BCB) is used for device passivation and planarization. The IC process is completed by NiCr resistors, thin film MIM capacitors, and three levels of Au-based interconnect metals.

With this process, InGaAs/InP DHBTs and integrated circuits can be manufactured as prototypes as well as in small and medium volumes. DC current gain and offset-voltage distributions for $1 \times 8 \text{ } \mu\text{m}^2$ emitter-size DHBTs across a 3" wafer are extremely homogeneous (Fig. 1). The mean values for the current gain and the offset-voltage were 90 ± 5 and $108 \pm 3 \text{ mV}$, respectively. These devices exhibited a breakdown voltage BV_{CE0} exceeding 5 V.



Typical frequency dependences of the current gain (h_{21}) and unilateral power gain (G_U), of a $1 \times 8 \text{ } \mu\text{m}^2$ device, as shown in Fig. 2, yield a cut-off frequency (f_T) of 265 GHz and a maximum oscillation frequency (f_{max}) of 305 GHz, using a -20 dB/decade extrapolation. Measurements were made at a collector current I_C of 18 mA and a collector-emitter voltage V_{CE} of 1.5 V.

Examples of ICs developed at Fraunhofer IAF in the past year are a five-stage distributed amplifier with 100 GHz bandwidth, shown in Fig. 3, together with its measured S-parameters and a VCO with maximal operating frequency of 86 GHz with low phase noise, as given in Fig. 4.

For circuit simulation, we have used the UCSD (University of California San Diego) transistor model. In collaboration with UCSD, a model extraction algorithm, customized for our InP-technology, has been implemented at Fraunhofer IAF. This model accounts for all important physical effects, e. g. velocity modulation and current blocking in DHBTs.

To increase the gain as well as the bandwidth of the distributed amplifier, a concept of two transistor stages in cascode configuration, instead of single transistor stages, has been implemented. As a result, the amplifier exhibited a small-signal gain of 9.5 dB with a -3 dB bandwidth of 101 GHz (Fig. 3). Good matching is achieved by using different terminating resistances in the input and output transmission lines. Fig. 3 shows also a chip photo of the InGaAs/InP DHBT-based distributed amplifier.

Fig. 3: Scattering parameters of a 100 GHz distributed amplifier. The chip size is $1.35 \times 0.65 \text{ mm}^2$.
Abb. 3: S-Parameter eines 100-GHz-Wanderwellenverstärkers. Die Schaltung hat eine Fläche von $1,35 \times 0,65 \text{ mm}^2$.

Dieser Prozess auf 3"-Wafeln eignet sich durchaus auch für Serien mit mittleren Stückzahlen. Die Verteilung der Gleichstromverstärkung und der Schwellenspannung über einer Scheibe für DHBTs mit $1 \times 8 \mu\text{m}^2$ großen Emittlern ist sehr homogen (Abb. 1). Der Mittelwert der Verstärkung ist 90 ± 5 , für die Schwellenspannung werden $108 \pm 3 \text{ mV}$ gemessen. Die Bauelemente haben eine Durchbruchspannung BV_{CE0} von über 5 V.

Die Frequenzabhängigkeiten der Kurzschlussstromverstärkung h_{21} und der unilateralen Leistungsverstärkung G_U für einen solchen Transistor (Abb. 2) liefern mit einer Extrapolation von -20 dB/Dekade eine Grenzfrequenz für die Stromverstärkung f_T von 265 GHz und eine maximale Schwingfrequenz f_{max} von 305 GHz, gemessen bei einem Kollektorstrom I_C von 18 mA und einer Kollektor-Emitter-Spannung V_{CE} von 1,5 V.

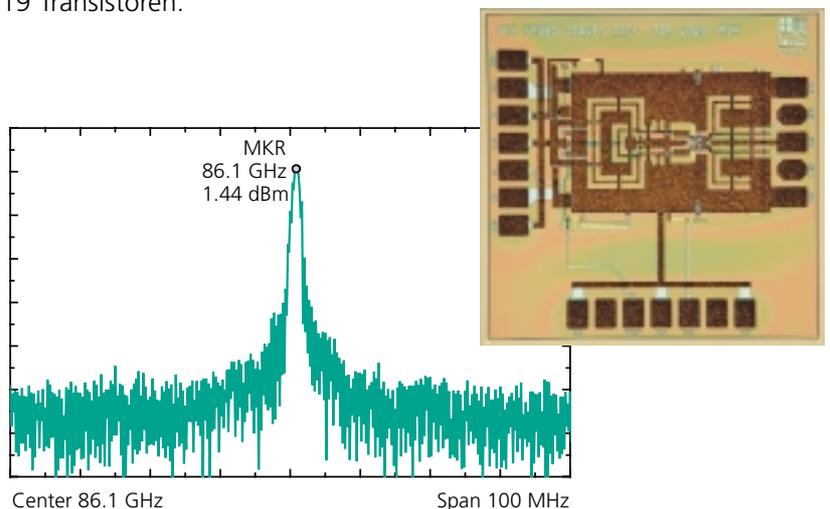
Schaltungsbeispiele sind u. a. ein fünfstufiger Wanderwellenverstärker mit 100 GHz Bandbreite, dessen S-Parameter in Abb. 3 wiedergegeben werden, und ein V_{CO} mit einer maximalen Schwingfrequenz von 86 GHz, der sich, wie in Abb. 4 gezeigt, durch niedriges Phasenrauschen auszeichnet.

Unsere Schaltungen wurden auf der Grundlage des UCSD-Modells (University of California San Diego) entworfen. In Kooperation mit der UCSD wurde ein für die beschriebene InP-Technologie zugeschnittenes Modellextraktionsverfahren entwickelt und am IAF implementiert. Dieses Modell für die Schaltungssimulation berücksichtigt alle wichtigen physikalischen Effekte in DHBTs, u. a. die Modulation der Elektronengeschwindigkeit und Stromblockade.

Um höhere Bandbreite und Verstärkung des Wanderwellenverstärkers zu erzielen, wurden Kaskodenstufen mit zwei Transistoren anstelle von Einzeltransistoren verwendet. Das Ergebnis ist ein Verstärker mit einer Kleinsignalverstärkung von 9,5 dB und einer 3-dB-Bandbreite von 101 GHz (Abb. 3). Gute Anpassung wurde durch den Einsatz unterschiedlicher Abschlusswiderstände in Ein- und Ausgangsleitung erreicht.

Der mit der Grundwelle operierende VCO mit Schwingfrequenzen bis zu 86 GHz eignet sich als Taktquelle für ETDM-basierende integrierte Schaltungen bei Bitraten über 80 Gbit/s. Er zeichnet sich durch ein sehr geringes Phasenrauschen von -102 dBc/Hz bei 86 GHz und einem Abstand von 1 MHz von der Trägerfrequenz, eine hohe Abstimmbandbreite von 5 GHz bei einer Variation in der Abstimmspannung von 2 V und eine für die Anwendung ausreichend hohe Ausgangsleistung aus (Abb. 4). Die Schaltung hat eine Komplexität von 19 Transistoren.

Fig. 4: Output-spectrum of an InP DHBT-based VCO at 86 GHz. The chip size is $1.25 \times 1.25 \text{ mm}^2$, although most of the area results from the measurement pads.
Abb. 4: Ausgangsspektrum eines auf InP-DHBT-Technologie basierenden Oszillators bei 86 GHz. Die Schaltung hat eine Fläche von $1,25 \times 1,25 \text{ mm}^2$ mit wesentlichem Anteil der Messkontakte.



The fundamental InP-based DHBT VCO with operation frequency up to 86 GHz is suited as a frequency source for ETDM MMICs (monolithic microwave integrated circuits) with data rates beyond 80 Gbit/s. The VCO features very low phase noise with -102 dBc/Hz at 86 GHz and an offset of 1 MHz, as well as relatively wide tuning bandwidth of 5 GHz over 2 V tuning voltage (Fig. 4). Output power levels are sufficient for the targeted application. The circuit has a complexity of 19 transistors.

Among other developed key ICs, a dynamic frequency divider-by-two has been realized in emitter-coupled logic (ECL) configuration. Fig. 5 displays a photograph and the input voltage V_{in} versus the input frequency f_{in} of the dynamic frequency divider. The single ended input is connected directly via a coupling capacitor to the divider core. The core outputs are connected to an output buffer, which is able to drive a 50Ω external load. The number of active components is approximately 70 and the chip size is $1.5 \times 1 \text{ mm}^2$. The chips were measured on-wafer using 50Ω coplanar test probes. The divider

circuit can be operated from 30 GHz to 86 GHz. The dc power consumption amounts to approximately 500 mW related to a supply voltage $V_{EE} = -5 \text{ V}$.

To further evaluate this technology, a low-power 2:1 multiplexer-core (selector), including data, clock, and output buffer has been realized. The whole circuit is designed in a differential topology and features about 30 transistors. The chip has been successfully tested up to 90 Gbit/s (Fig. 6). At a supply voltage of -3.5 V, the chip consumes a current of only 110 mA. The output signal voltage swing at 90 Gbit/s is about 250 mV, into a 50Ω load.

Finally, state-of-the-art 80 Gbit/s 2:1 multiplexer (MUX) and 1:2 demultiplexer (DEMUX) have been designed (ECL-logic) and successfully manufactured. Both ICs require supply voltages of $V_{EE} = -4.5 \text{ V}$ and $V_{CC} = 1 \text{ V}$ and are able to drive 50Ω loads.

MUX: The incoming parallel 40 Gbit/s data streams are latched into the data latches with the falling edges of the internal differential clock signal. Both latched data signals lead to the MUX core. This circuit part converts both parallel data streams to a serial 80 Gbit/s signal. The MUX needs two single ended data input signals of approximately 600 mV_{pp} per channel. The

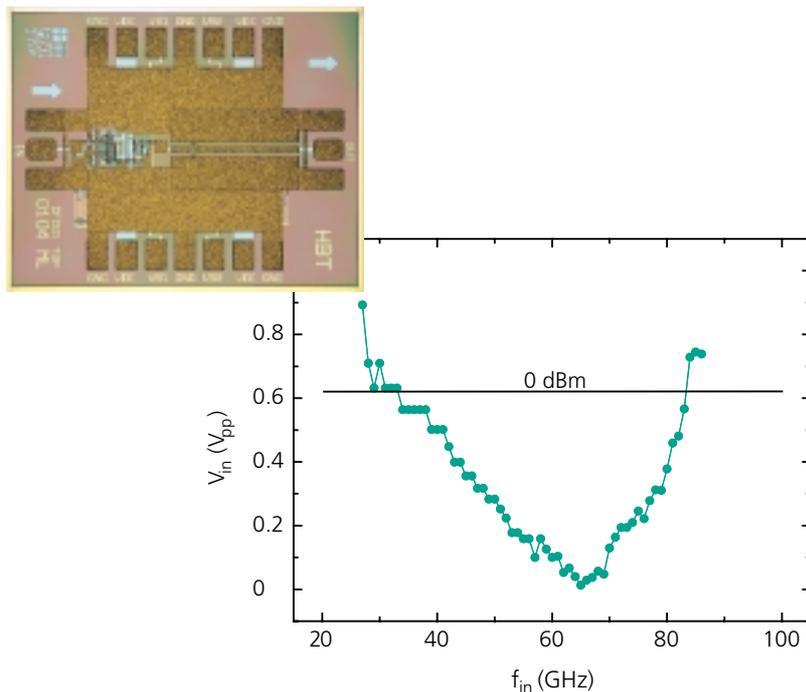


Fig. 5: Input sensitivity V_{in} vs. input frequency f_{in} of dynamic frequency divider-by-two.

Abb. 5: Eingangsempfindlichkeit V_{in} als Funktion der Frequenz f_{in} eines dynamischen Frequenzteilers (: 2).

Eine weitere Schlüsselkomponente, die am Fraunhofer IAF entwickelt wurde, ist ein dynamischer Frequenzteiler (: 2) in ECL-Technik. Abb. 5 zeigt die 1,5x1 mm² große Schaltung, die ca. 70 aktive Bauelemente enthält. Die Abbildung gibt ferner die minimal erforderliche Signal-Eingangsspannung V_{in} als Funktion der Eingangsfrequenz f_{in} wieder. Das einphasige Eingangssignal wird über eine Koppelkapazität direkt der Teilerschaltung zugeführt. Deren Ausgänge führen zu einer Ausgangsstufe, die in der Lage ist, eine 50 Ω -Last zu treiben. Die Schaltungen wurden unter Verwendung von koplanaren 50 Ω -Messköpfen analysiert. Der Betriebsbereich der Schaltung ist 30 GHz bis 86 GHz. Die Verlustleistung liegt bei 500 mW, bezogen auf eine Versorgungsspannung von $V_{EE} = -5$ V.

Ein weiterer Beweis unserer InP-DHBT-Technologie ist ein verlustarmer 2:1-Multiplexerkern (Selektor) (Abb. 6). Dieser enthält jeweils einen Puffer an seinen Daten- und Takteingängen sowie am Datenausgang. Die gesamte Schaltung basiert auf einer differentiellen Topologie und enthält 30 Transistoren. Der Selektor konnte bei Datenraten bis zu 90 Gbit/s erfolgreich betrieben werden. Bei einer Versorgungsspannung von -3,5 V beträgt die Stromaufnahme lediglich 110 mA. An einem 50 Ω -Lastwiderstand beträgt der Spannungshub des Ausgangssignals bei 90 Gbit/s 250 mV.

Weitere 80-Gbit/s-Schaltungen, die in ECL-Technik erfolgreich realisiert werden konnten, sind ein 2:1-Multiplexer (MUX) und ein 1:2-Demultiplexer (DEMUX). Die erforderlichen Versorgungsspannungen sind $V_{EE} = -4,5$ V und $V_{CC} = 1$ V. Die Ausgänge der Schaltungen sind in der Lage, 50 Ω -Lasten zu treiben.

Multiplexer: Die an den beiden Eingängen anstehenden parallelen Datensignale von jeweils 40 Gbit/s werden während der fallenden Flanke des intern erzeugten differentiellen Taktsignals übernommen. Die Ausgänge der Daten-Flip-Flops führen zum Kern des Multiplexers, welcher die beiden parallelen Signale zu einem seriellen 80 Gbit/s-Datensignal umformt. Der Multiplexer benötigt an seinen beiden einphasigen Dateneingängen Signale mit einer Amplitude von ca. 600 mV_{pp}. Das erforderliche einphasige Taktsignal liegt bei ca. 200 mV_{pp}. Die Verlustleistung der Schaltung beträgt ca. 2 W.

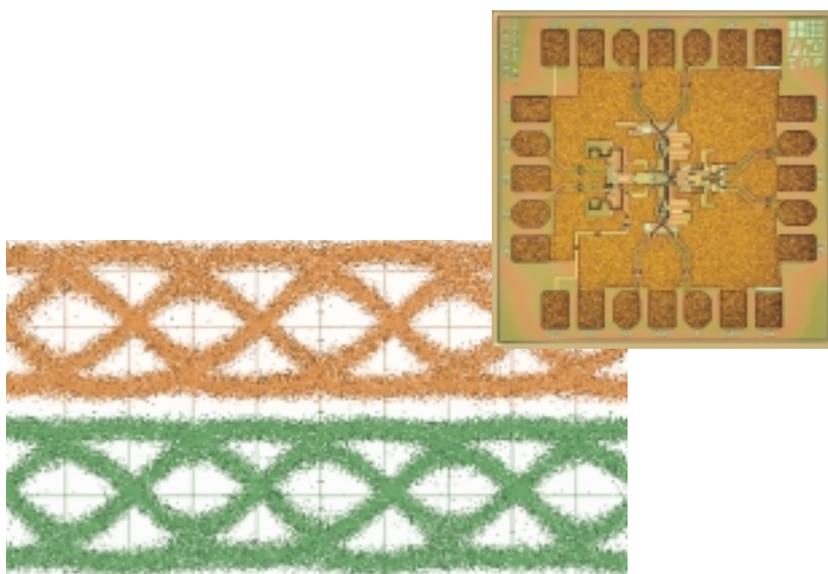


Fig. 6: Output eye-diagram of a 2:1 selector IC at 90 Gbit/s data rate. The chip size is 1x1 mm².

Abb. 6: Augendiagramm eines 2:1-Selektors bei einer Datenrate von 90 Gbit/s. Die Chipgröße ist 1x1mm².

required single ended clock signal amounts to > 200 mV_{pp}. The total power consumption of this circuit is approximately 2 W. Fig. 7 shows the chip photograph and the output eye-diagram of the 2:1 MUX at a data rate of 80 Gbit/s.

DEMUX: The task of this IC is to convert the incoming serial data signal to parallel ones. The incoming serial data stream is latched into two data flip-flops during the falling edge of the internal differential clock signal. The outputs of both data flip-flops lead to the differential output stages. The circuit contains approximately 200 active components.

Pattern generators capable of 80 Gbit/s signals being currently not available, we have tested the circuit with a data stream of 40 Gbit/s and a clock frequency of 20 GHz. The DEMUX needs a single ended input data signal of ~ 600 mV_{pp}.

The required single ended clock signal amounts to > 200 mV_{pp}. The total power consumption of this circuit is about 1.8 W. A chip photograph and the eye-diagrams of the 1:2 DEMUX outputs at an input data rate of 40 Gbit/s are shown in Fig. 8.

Present and future developments are being focused on the development of higher integrated multi-functional ICs (such as clock and data recovery). The present results confirm, however, that InP-based DHBTs are capable to deliver the performance for all key ICs required in future high-speed (≥ 80 Gbit/s) fiber-optic communication systems.

Peter Asbeck and his group of the University of California San Diego (UCSD) are gratefully acknowledged for their generous support and guidance in device modelling.

This work is part of a joint research project (MultiTeraNet), funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

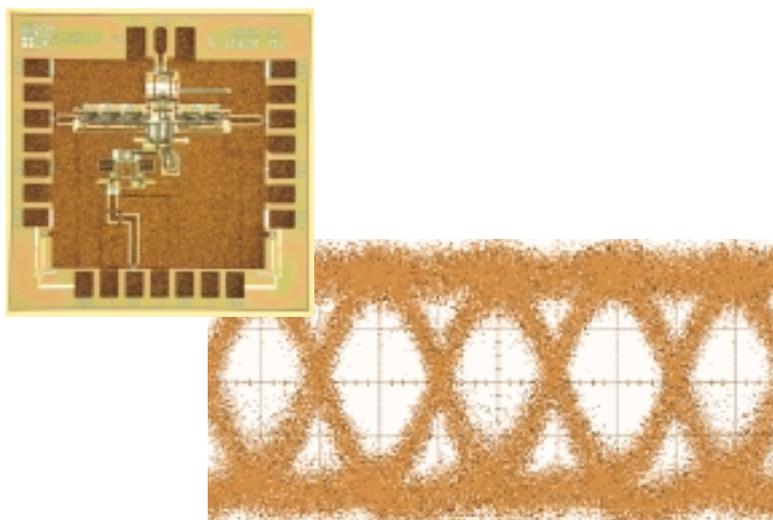


Fig. 7: Output signal eye-diagram of 80 Gbit/s 2:1 multiplexer circuit. The chip size is 1.25x1.25 mm².
Abb. 7: Augendiagramm des Ausgangssignals eines 80 Gbit/s-2:1-Multiplexers. Die Chipgröße beträgt 1,25x1,25 mm².

Abb. 7 zeigt das Chipfoto des 2:1-Multiplexers und das Augendiagramm des Ausgangssignals bei einer Datenrate von 80 Gbit/s.

Demultiplexer: Diese Schaltung formt ein serielles Datensignal in mehrere parallele Signale um. Das ankommende Datensignal wird während des Abfalls des intern erzeugten differentiellen Taktsignals in den beiden parallelen Daten-Flip-Flops gespeichert. Die Ausgänge dieser führen zu differentiellen Ausgangsstufen, welche externe 50 Ω -Lasten treiben können. Die Schaltung beinhaltet etwa 200 aktive Elemente.

Da Pulsgeneratoren mit 80-Gbit/s-Datensignalen noch nicht erhältlich sind, haben wir den DEMUX mit einem Datensignal von 40 Gbit/s bzw. einem Taktsignal von 20 GHz getestet. Der DEMUX benötigt ein einphasiges Datensignal mit einer Amplitude von ca. 600 mV_{pp} und einem, ebenfalls einphasigen, Taktsignal von > 200 mV_{pp}. Die Verlustleistung der Schaltung liegt bei ca. 1,8 W. Das Chipfoto und die Augendiagramme des 1:2-DEMUX zeigt Abb. 8.

Gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen werden sich auf höher integrierte multifunktionale ICs konzentrieren, z. B. für die Takt- und Daten-Rückgewinnung. Unsere vorliegenden Ergebnisse bestätigen jedoch das Potential von InP-basierenden DHBTs für die Realisierung aller wesentlichen Schaltungen für zukünftige optische Datenübertragungssysteme mit Bitraten von 80 Gbit/s und mehr.

Wir danken Peter Asbeck und seiner Gruppe an der Universität San Diego (UCSD), Kalifornien, für die Unterstützung bei der Bauelemente-Modellierung und die großzügige Zusammenarbeit.

Diese Arbeit ist Teil des Verbundprojekts »Multi-TeraNet«, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

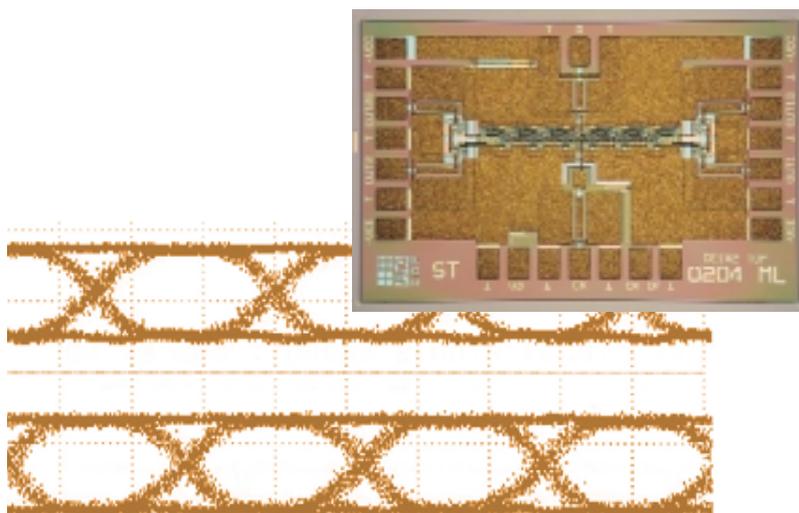
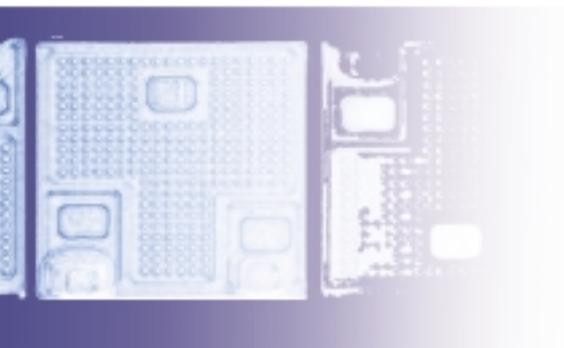


Fig. 8: Eye-diagram of both output-signals of the 80 Gbit/s 1:2 demultiplexer IC at an input data rate of 40 Gbit/s. The chip size is 1.5x1 mm².

Abb. 8: Beide Ausgangssignale des 80-Gbit/s-Demultiplexers (1:2) bei einer Eingangsdatenrate von 40 Gbit/s. Die Chipgröße beträgt 1,5x1 mm².



Infrared Sensors Infrarot-Sensoren



Infrared sensors for wavelengths from 3 – 20 μm are in the focus of our IR-technology. These quantum well infrared photodetectors (QWIP) based on intersubband transitions in superlattices show record thermal and spatial resolution. For the next detector generation with even higher sensitivity we use antimonides and short period superlattices. For high efficiency dual-band IR detectors MCT structures will be used.

Infrarot-Sensoren für den Spektralbereich von 3 – 20 μm stehen im Mittelpunkt unserer IR-Technologie. Diese Quantenfilm-Infrarot-Photodetektoren (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) nutzen Intersubbandübergänge in (AlGa)As-Halbleiterübergittern aus. Antimonidische Halbleiter und Übergitter werden für die nächste Detektorgeneration mit noch höherer Empfindlichkeit verwendet. Für Zwei-Band-IR-Detektoren mit hoher Quanteneffizienz werden HgCdTe-Strukturen entwickelt.

Applications

- IR detectors for 3 – 5 μm and 8 – 12 μm
- QWIP cameras with 640x512 pixels
- medical thermography
- surveillance and security

Anwendungen

- QWIPs für 3 – 5 μm und 8 – 12 μm
- hochauflösende Wärmebildkameras mit 640x512 Bildpunkten
- medizinische Thermographie
- Überwachung und Sicherheit



IR Camera for 3 – 5 μm With InAs/GaSb Superlattices

Robert Rehm
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 53
robert.rehm@iaf.fraunhofer.de

In 2004, the world's first 256x256 focal plane array (FPA) infrared camera system based on InAs/GaSb short period superlattices (SLs) for the 3 – 5 μm wavelength regime was fabricated in collaboration with AIM Infrarot-Module GmbH, Heilbronn. This major breakthrough in development of new high-performance IR detectors again demonstrates the successful cooperation of our Institute with AIM.

Materials development of InAs/(GaIn)Sb SLs with broken gap type II band alignment and processing of FPA detector chips were carried out at Fraunhofer IAF. Hybridization of the detector array with a read-out integrated circuit (ROIC) using indium solder bump technology, manufacturing assembly of the integrated detector cooler, and camera fabrication were performed at AIM.

The InAs/GaSb SL detector structure consists of 190 periods of an InAs/GaSb SL, grown by molecular beam epitaxy on 2" GaSb substrates. The

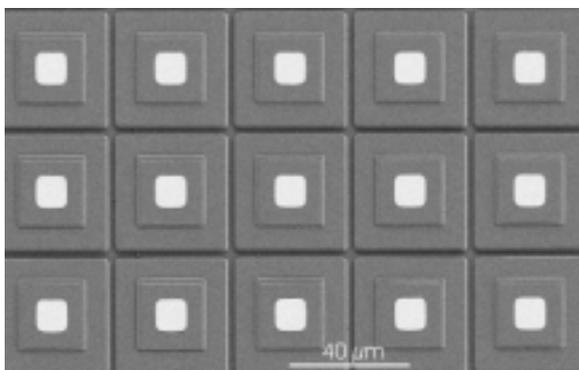


Fig. 1: SEM picture of InAs/GaSb detector pixels in a 256x256 FPA with 40 μm pitch.
Abb. 1: REM-Aufnahme von InAs/GaSb-Detektorelementen in einer 256x256 Bildfeldmatrix mit 40 μm Mittenabstand.

thickness of the individual layers, growth conditions and shutter sequences have been carefully adjusted to meet the desired bandgap and to compensate the strain caused by the lattice mismatch between InAs and GaSb.

The lower part of the pin-detector is p-doped, followed by an undoped region and a n-doped stack on top of the structure. FPAs with 256x256 detector elements and 40 μm pitch have been fabricated in a full wafer process using standard optical lithography. Process technology for the fabrication of FPAs includes several dry- and wet-etching steps and various metallization layers to establish ohmic contacts, a reflector on top of the mesa, and contact pads for hybridization with the ROIC. Each wafer contains four completely passivated FPAs with a size of 11.2x11.2 mm^2 and additionally various test diodes for materials characterization.

The new mid-IR thermal imaging system with a cut-off wavelength of 5.4 μm has dynamic impedance values of $R_0A = 4 \times 10^5 \Omega\text{cm}^2$ at 77 K and beyond $1 \times 10^6 \Omega\text{cm}^2$ at 67 K, respectively. The diodes are limited by generation-recombination currents and show background limited performance. Quantum efficiencies around 30 % and detectivity values exceeding 10^{13} Jones at 77 K are determined for FPA detector pixels under backside illumination.

Excellent thermal resolution with a median noise equivalent temperature difference (NETD) of 9.4 mK was measured at an integration time of 6.5 ms using f/2 optics. Pixel outages are below 1 % and appear statistically distributed, predominantly as single pixel faults mostly caused by defective pixels on the SL detector chip itself. Thermal images show excellent thermal and spatial resolution and low cross talk between neighboring detector elements.

With this demonstrator camera, it is obvious, that InAs/GaSb SLs are now in the position to provide low NETD values in the 3 – 5 μm wavelength range at short integration times comparable to those of HgCdTe detectors. The excellent performance of the camera system demonstrates the high potential of InAs/GaSb SLs for the fabrication of advanced IR imaging systems.

Infrarot-Kamera für 3 – 5 μm mit InAs/GaSb-Übergittern

In Kooperation mit unserem Industriepartner AIM Infrarot-Module GmbH, Heilbronn, wurde im Jahr 2004 die weltweit erste Infrarot-Kamera mit 256x256 Bildpunkten basierend auf kurzperiodigen InAs/GaSb-Übergittern für den Spektralbereich zwischen 3 – 5 μm hergestellt. Dieser entscheidende Durchbruch in der Entwicklung neuartiger IR-Detektoren höchster Leistungsfähigkeit ist zum wiederholten Mal ein Beispiel für die erfolgreiche Kooperation unseres Institutes mit AIM.

Die Herstellung von InAs/GaSb-Übergittern mit gebrochener Typ-II-Bandanordnung und die Prozesstechnik für fertige Bildfeldmatrizen wurden am Fraunhofer IAF entwickelt. Die Hybridisierung der Detektormatrix mit dem Auslese-schaltkreis mittels Indium-Lötsäulen, die Integration in den thermoelektrischen Kühler und der Aufbau zur vollständigen IR-Kamera wurden bei AIM durchgeführt.

Die Detektorstruktur besteht aus 190 Perioden eines InAs/GaSb-Übergitters, welches mit Molekularstrahlepitaxie auf 2"-GaSb-Substrat gewachsen wurde. Die Einzelschichtdicken und Wachstumsparameter wurden angepasst, um den geforderten Bandabstand zu realisieren und die Gitterfehlpassung zwischen InAs und GaSb zu kompensieren.

Der untere Teil des pin-Detektors ist p-dotiert, wonach ein undotierter und ein n-dotierter Bereich folgen. Bildfeldmatrizen mit 256x256 Einzeldetektoren und 40 μm Detektormittenabstand wurden mit optischer Lithographie hergestellt. Die Herstellungstechnologie gliedert sich in verschiedene Trocken- und Nassätzprozesse sowie mehrere Metallisierungen zur Realisierung von ohmschen Kontakten, einem Rückkoppelspiegel auf jedem Detektorelement und Kontakten für die Hybridisierung mit dem Auslese-schaltkreis. Jeder Wafer beinhaltet vier vollständig passivierte Detektormatrizen mit einer Fläche von 11,2x11,2 mm^2 sowie eine Reihe von Testdioden zur Materialcharakterisierung.

Diese neuen Detektoren für thermographische Anwendungen im mittleren Infrarot besitzen bei einer Grenzwellenlänge von 5,4 μm und 77 K eine dynamische Impedanz R_0A von

$4 \times 10^5 \Omega\text{cm}^2$ und bereits über $1 \times 10^6 \Omega\text{cm}^2$ bei 67 K. Die Dioden zeigen hintergrundlimitiertes Verhalten. Unter Rückseitenbeleuchtung wird für Einzeldetektorelemente eine Quanteneffizienz um 30 % und eine Detektivität oberhalb von 10^{13} Jones bei 77 K bestimmt.

Eine hervorragende thermische Auflösung (NETD) von 9,4 mK wurde bei 6,5 ms Integrationszeit mit einer f/2-Optik gemessen. Die Pixelausfälle liegen unterhalb von 1 %, wobei es sich vorwiegend um statistisch verteilte Einzelausfälle handelt. Die Aufnahmen der Kamera belegen herausragende thermische und räumliche Auflösung und geringes Übersprechen zwischen benachbarten Detektorelementen.

Wie durch diese erste Kamera gezeigt werden konnte, lässt sich mit InAs/GaSb-Übergittern im zweiten atmosphärischen Fenster bei 3 – 5 μm eine geringe NETD bei kurzen Integrationszeiten vergleichbar mit HgCdTe-Detektoren erzielen. Die hervorragende Leistungsfähigkeit des Kamerasystems zeigt eindrucksvoll die Perspektiven von InAs/GaSb-Übergittern für die Realisierung zukünftiger bildgebender Systeme im infraroten Spektralbereich.



Fig. 2: Thermal image of an AIM colleague taken with the 256x256 InAs/GaSb SL camera. Brighter areas indicate colder parts.

Abb. 2: Wärmebild eines AIM-Mitarbeiters, aufgenommen mit der 256x256 InAs/GaSb-Übergitter-Kamera. Hellere Bereiche kennzeichnen kühlere Stellen.



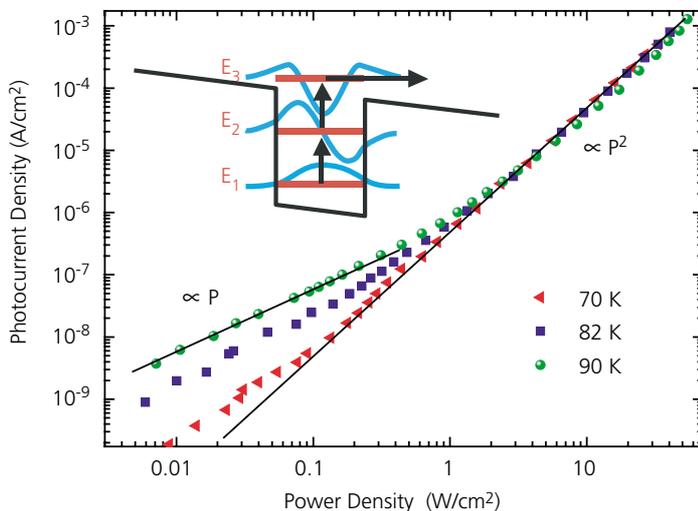
Two-Photon QWIP

Harald Schneider
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 59
harald.schneider@iaf.fraunhofer.de

Quantum-well infrared photodetectors (QWIP) have developed into a mature technology for focal plane arrays (FPA) with excellent thermal and spatial resolution. We have improved our 3 – 5 μm / 8 – 12 μm dual-band QWIP FPA with 384x288 pixels, which has been described in detail in our previous Annual Report, with now impressive noise-equivalent temperature differences (NETD) of 27 mK and 21 mK in the 3 – 5 μm and 8 – 12 μm atmospheric windows, respectively, at a f/2 field-of-view and 6.8 ms integration time. This is the first dual-band FPA worldwide with NETDs below 30 mK in both bands.

Here we will focus on a new two-photon QWIP for a completely different application, namely pulse diagnostics of ps and fs lasers in the thermal infrared.

The two-photon QWIP relies on three subbands at equidistant energies E_1 , E_2 , and E_3 . As indicated in the inset of Fig. 1, levels 1 and 2 are bound in the QW, whereas state 3 is a continu-



um resonance located close to the barrier energy. In an external electric field, the carriers excited into the continuum are swept out of the QW and give rise to a photocurrent.

Fig. 1 shows the photocurrent density of a two-photon QWIP comprising 20 n-type GaAs QWs of 7.6 nm width separated by 46 nm $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ barriers, vs. power density P upon CO_2 laser illumination. The photocurrent exhibits a quadratic dependence on P down to powers as low as 0.1 W/cm^2 at 70 K (1 W/cm^2 at 90 K), with a linear dependence at even lower powers. The quadratic regime yields an extremely high two-photon absorption coefficient of $\beta = 1.3 \times 10^7 \text{ cm}/\text{GW}$, about six orders of magnitude larger than in bulk crystals.

Quadratic autocorrelation is the main diagnostic method to determine the characteristics of ultra-short optical pulses. Here each pulse is split into two time-delayed parts which are superimposed on a quadratic detector. The high sensitivity of the present two-photon QWIP allows these measurements even at extremely low pulse intensities in the pJ regime.

Fig. 2 (a) shows the interferometric autocorrelation of infrared pulses at 8 μm wavelength using a two-photon QWIP with 6.8 nm $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ QWs and $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ barriers. While the interference fringes around zero time delay correspond to those of a nearly ideal autocorrelation of the optical field, additional signatures are associated with the intrinsic time constants of the detector. The simulation in Fig. 2 (b) indicates that the autocorrelation trace is well understood. In particular, the temporal width of the excitation pulse (165 fs) can be reliably determined from the measurement.

Fig. 1: Photocurrent density of a two-photon-QWIP, at peak wavelength of 10.3 μm and 1.5 V detector bias, versus power density for different temperatures. The inset indicates the operation of the device.

Abb. 1: Photoströmdichte eines Zwei-Photon-QWIPs bei der Peak-Wellenlänge von 10,3 μm und 1,5 V Vorspannung als Funktion der Leistungsdichte bei unterschiedlichen Temperaturen. Das Innenbild veranschaulicht die Funktionsweise des Bauelements.

Quantum-Well-Infrarot-Photodetektoren (QWIP) erlauben heute die Realisierung von Bildfeldmosaikern (FPA) mit hervorragender Temperatur- und Ortsauflösung. Unser im letzten Jahresbericht beschriebenes bispektrales QWIP-FPA mit 384x288 Bildelementen und gleichzeitiger Empfindlichkeit im zweiten und dritten atmosphärischen Fenster wurde weiter verbessert und zeigt nun beeindruckende rausch-äquivalente Temperaturdifferenzen (NETD) von 27 mK bzw. 21 mK ($f/2$, 6,8 ms). Dies ist das weltweit erste Dual-Band-FPA mit NETDs unterhalb von 30 mK in beiden Bändern.

Hier stellen wir einen neuen Zwei-Photonen-QWIP für eine ganz andere Anwendung vor, nämlich die Pulsdiagnostik von ps- und fs-Lasern im thermischen Infrarot.

Der Zwei-Photonen-QWIP beruht auf drei Subbändern mit äquidistanten Energien E_1 , E_2 und E_3 . Wie im Innenbild von Abb. 1 gezeigt, sind die Zustände 1 und 2 im Quantenfilm (QW) gebunden, der Zustand 3 ist eine Kontinuumsresonanz in der Nähe der Barrierenenergie. In einem externen elektrischen Feld verlassen die ins Kontinuum angeregten Ladungsträger den Quantenfilm und erzeugen einen Photostrom.

Abb. 1 zeigt die Photostromdichte eines Zwei-Photonen-QWIPs mit 20 n-dotierten, 7,6 nm breiten GaAs-QWs und 46 nm $\text{Al}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ -Barrieren als Funktion der Leistungsdichte P

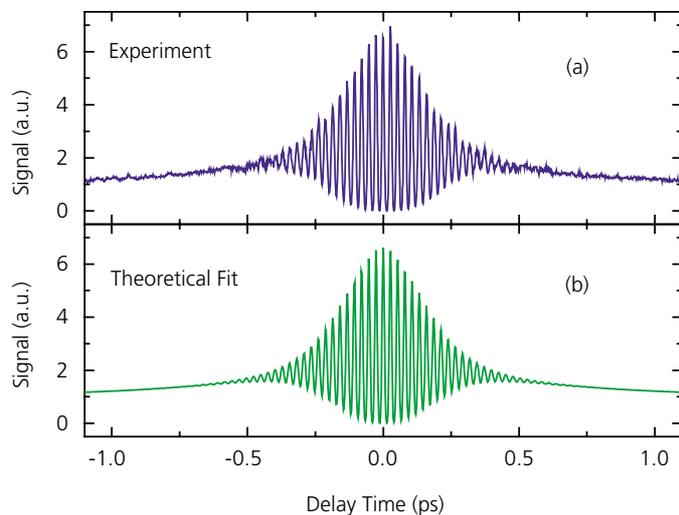
eines CO_2 -Lasers. Der Photostrom zeigt eine quadratische Leistungsabhängigkeit bis zu sehr geringen Werten von $0,1 \text{ W/cm}^2$ bei 70 K (1 W/cm^2 bei 90 K) und eine lineare Abhängigkeit bei noch kleineren Leistungen. Aus dem quadratischen Bereich ergibt sich ein Zwei-Photonen-Absorptionskoeffizient von $\beta = 1,3 \times 10^7 \text{ cm/GW}$, ca. sechs Größenordnungen höher als in Volumenkristallen.

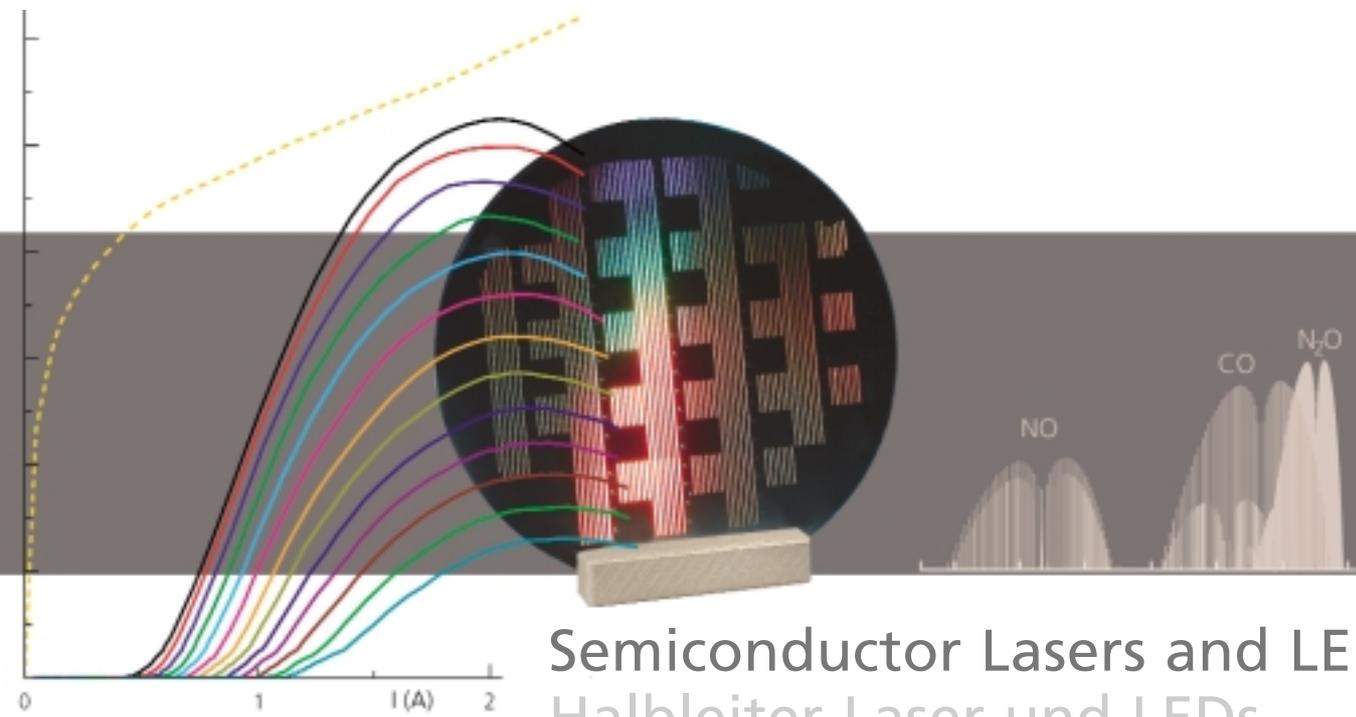
Die Messung der quadratischen Autokorrelation ist die wichtigste Methode zur Charakterisierung ultrakurzer optischer Pulse. Hierbei wird jeder Puls in zwei zeitverzögerte Anteile aufgespalten, die auf einem quadratischen Detektor überlagert werden. Die hohe Empfindlichkeit des hier beschriebenen Zwei-Photonen-QWIPs lässt diese Messungen sogar bei extrem geringen Pulsintensitäten im pJ-Bereich zu.

Abb. 2 (a) zeigt die interferometrische Autokorrelation von Infrarotpulsen bei $8 \mu\text{m}$ Wellenlänge unter Verwendung eines Zwei-Photonen-QWIPs mit $6,8 \text{ nm}$ $\text{In}_{0,10}\text{Ga}_{0,90}\text{As}$ -QWs und $\text{Al}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ -Barrieren. Während die Interferenzen bei kleiner Zeitverzögerung einer nahezu idealen Autokorrelation entsprechen, erzeugen die intrinsischen Zeitkonstanten des Detektors zusätzliche Signaturen. Wie aus der Simulation in Abb. 2 (b) ersichtlich, ist der Verlauf der Autokorrelation gut verstanden. Insbesondere lässt sich die Dauer der 165 fs kurzen Anregungspulse zuverlässig bestimmen.

Fig. 2: (a) Two-photon photocurrent autocorrelation of fs infrared pulses at $8.0 \mu\text{m}$ wavelength and (b) numerical fit versus delay time. The signal is normalized to its value at a large delay time beyond 10 ps.

Abb. 2: (a) Zwei-Photon-Photostrom-Autokorrelation von fs-Infrarotpulsen bei $8,0 \mu\text{m}$ Wellenlänge und (b) numerischer Fit als Funktion der Verzögerungszeit. Das Signal ist normiert auf dessen Wert bei langen Verzögerungszeiten oberhalb von 10 ps.





Semiconductor Lasers and LEDs

Halbleiter-Laser und LEDs

A variety of semiconductor lasers, with emission wavelengths covering the entire spectral range from ultraviolet (UV) to infrared (IR), are available from the Fraunhofer IAF: (AlGa)N lasers for short wavelengths, GaAs power lasers with wavelengths around 1 μm and quantum cascade lasers (QCL) for the mid-IR. We work on GaN-based LEDs with UV or blue emission which is converted into green, red or even white light by luminescence conversion in LUCO-LEDs.

Applications

- diode lasers for materials processing and optical pumping
- QCLs for environmental control and optronic counter measures
- blue lasers for optical data storage
- LUCO-LEDs for illumination

Vom Ultravioletten bis zum Infraroten reicht der Spektralbereich, der von unseren Halbleiterlasern abgedeckt wird: (AlGa)N-Laser für kurzwellige Laseremission, Hochleistungslaser mit Wellenlängen um 1 μm aus GaAs und Quantenkaskadenlaser (QCL) für das mittlere Infrarot werden im Fraunhofer IAF hergestellt. Wir entwickeln GaN-basierende LEDs, deren ultraviolettes oder blaues Licht in LUCO-LEDs durch Lumineszenzkonversion in Grün oder Rot und sogar in Weiß verwandelt wird.

Anwendungen

- Leistungslaser für Materialbearbeitung und optisches Pumpen
- QCLs für Umweltmesstechnik und optische Gegenmaßnahmen
- blaue Laser für Datenspeicherung
- LUCO-LEDs für Beleuchtung



Quantum Cascade Lasers for Gas Sensing

Christian Mann
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-5 44
christian.mann@iaf.fraunhofer.de

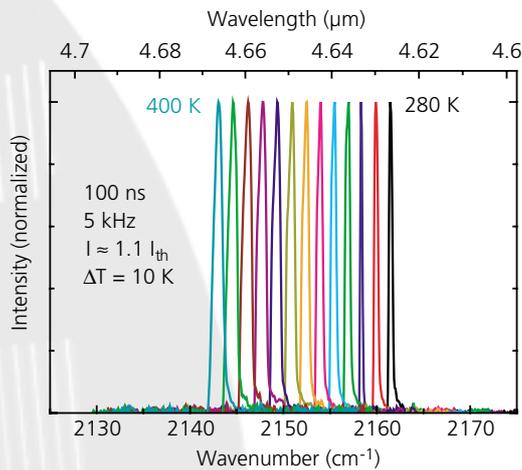


Fig. 1: Temperature-dependent pulsed lasing spectra of a DFB QC laser designed for detection of CO.
Abb. 1: Temperaturabhängige Emissionsspektren eines DFB-QC-Lasers für die Detektion von CO im Pulsbetrieb.

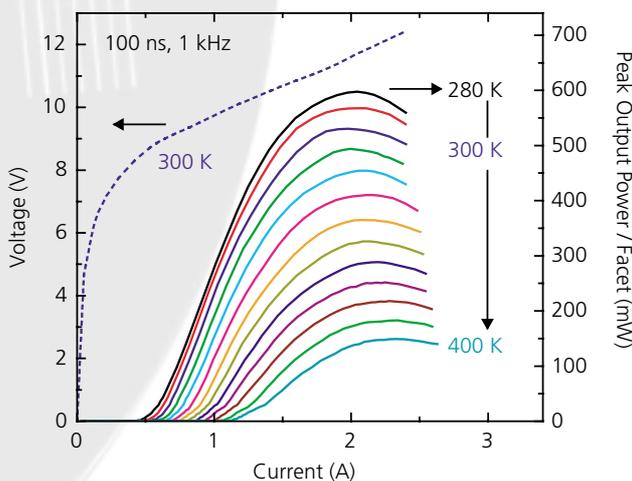


Fig. 2: Temperature-dependent P-I-characteristics and 300 K V-I-characteristic of a DFB QC laser designed for detection of CO.
Abb. 2: Temperaturabhängige P-I-Kennlinien und V-I-Kennlinie bei 300 K eines DFB-QC-Lasers für die Detektion von CO.

Infrared semiconductor lasers emitting at wavelengths between 4 and 13 μm are of increasing importance for spectroscopic trace-gas sensing in environmental and production control as well as in medical diagnostics. The quantum cascade (QC) laser is well-suited to cover this wavelength range with maximum operating temperatures well above room-temperature, at least in pulsed mode operation. As the fundamental rotational-vibrational transitions of most molecules, which fall within the above wavelength range, exhibit much larger absorption strengths than overtone modes in the near-infrared spectral range, higher sensitivities can be obtained. For high-resolution gas spectroscopy single-mode laser emission, tunable over an energy range of at least $1 - 2 \text{ cm}^{-1}$, is required.

To realize single-mode QC lasers for specific gas sensing applications and, in parallel, to develop appropriate measurement equipment and procedures, a joint three years' research project (QUANKAS), funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), was launched in 2001. In this project research was carried out jointly by Fraunhofer IAF, Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques (IPM) as well as research groups at the Universities of Würzburg and Darmstadt. In parallel a second consortium formed by SMEs worked towards the industrial application of QC laser-based gas detection systems.

The task of Fraunhofer IAF within QUANKAS was to provide GaInAs/AlInAs/InP-based single-mode QC lasers for specified trace gases to be detected. The active region of the QC laser, composed of 25 periods of a three- or four-quantum well active region connected by a superlattice transition and injector region, as well as the surrounding GaInAs separate confinement layers were grown by molecular-beam epitaxy (MBE) on 2-inch InP substrates. To achieve single-mode operation, the distributed feedback (DFB) laser concept was adopted. The index-coupled DFB grating was defined by electron-beam lithography and transferred into the top GaInAs separate confinement layer by reactive ion etching (RIE). The upper InP cladding and contact layers were then grown by low-pressure metal-organic vapor phase epitaxy

Quantenkaskadenlaser für die Gassensorik

Halbleiterlaser mit Emissionswellenlängen im infraroten Spektralbereich zwischen etwa 4 und 13 μm sind von zunehmendem Interesse für Anwendungen im Bereich der Umwelt- und Produktionsmesstechnik sowie in der medizinischen Diagnostik. Dieser Wellenlängenbereich kann mit Hilfe von Quantenkaskadenlasern (QC-Lasern) abgedeckt werden, die – zumindest gepulst – bei Raumtemperatur und darüber betrieben werden können. Die fundamentalen Rotations-Schwingungs-Übergänge vieler Moleküle liegen im oben erwähnten Wellenlängenbereich. Da ihre Absorptionslinienstärken im Vergleich zu den Oberton-Moden im nahen Infrarot wesentlich größer sind, können auf diese Weise größere Nachweisempfindlichkeiten erreicht werden. Anwendungen im Bereich der hochauflösenden Gasspektroskopie erfordern den einmodigen Betrieb der Laserquelle sowie die Durchstimmbarkeit über einen Energiebereich von mindestens $1 - 2 \text{ cm}^{-1}$.

Zur Realisierung einmodiger QC-Laser für gezielte Anwendungen im Bereich der Spurengasanalytik und zur gleichzeitigen Entwicklung geeigneter Messsysteme und Messverfahren wurde im Jahr 2001 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein dreijähriges Verbundprojekt (QUANKAS) ins Leben gerufen. Die FuE-Arbeiten zu diesem Projekt am Fraunhofer IAF wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) sowie den Universitäten in Würzburg und Darmstadt durchgeführt. Gleichzeitig arbeitete ein Verbund aus KMUs an der industriellen Anwendung QC-Laser-basierender Gasanalyseysteme.

Innerhalb des QUANKAS-Verbundes hat das Fraunhofer IAF einmodige GaInAs/AlInAs/InP-basierte QC-Laser für die Detektion ausgewählter Spurengase entwickelt. Der aus 25 Perioden bestehende aktive Bereich der Bauelemente sowie die ihn umgebenden GaInAs-Wellenführungsschichten werden mittels Molekularstrahl-epitaxie (MBE) auf 2-Zoll-InP-Substrate aufgewachsen. Zur Realisierung der einmodigen Laseremission wird das Konzept der räumlich verteilten Rückkopplung (distributed feedback, DFB) angewendet. Dazu wird das index-gekoppelte DFB-Gitter mittels Elektronenstrahlolithographie und reaktivem Ionenätzen (RIE) in die obere GaInAs-Wellenführungsschicht eingeschrieben.

Danach werden die oberen InP-Mantel- und -Kontaktschichten mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) aufgewachsen; das InP-Substrat selbst dient als untere Mantelschicht. Abschließend werden Mesawellenleiter mit Breiten zwischen 7 und 34 μm mittels optischer Lithographie und chemisch assistiertem Ionenstrahlätzen (CAIBE) hergestellt.

Für die QUANKAS-Verbundpartner wurden vom IAF einmodige DFB-QC-Laser für die Detektion von NO und CO bereitgestellt. Abb. 1 zeigt im Pulsbetrieb (100 ns Pulslänge, 5 kHz Wiederholrate) in Abhängigkeit der Temperatur aufgenommene Emissionsspektren eines DFB-QC-Lasers für die Detektion von CO. Die Spektren zeigen im gesamten Temperaturbereich (280 – 400 K) einmodigen Laserbetrieb mit einer Seitenmodenunterdrückung (SMSR) $> 27 \text{ dB}$. Der Koeffizient für die spektrale Durchstimmung mit der Temperatur beträgt $-0,153 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$. Temperaturabhängige Leistungs-Strom (P-I)-Kennlinien sind zusammen mit der Spannungs-Strom (V-I)-Kennlinie bei 300 K in Abb. 2 dargestellt (100 ns Pulslänge, 1 kHz Wiederholrate). Die maximal emittierte optische Leistung im Puls beträgt 600 mW bei 280 K. Sie sinkt auf immer noch beachtliche 140 mW bei 400 K. Die realisierten Betriebstemperaturen, emittierten optischen Leistungen sowie die Seitenmodenunterdrückung und Durchstimmbarkeit der DFB-QC-Laser genügen somit den Anforderungen der hochauflösenden Gasspektroskopie bzw. übertreffen diese sogar.

In Abb. 3 sind die Wellenlängen der am IAF realisierten einmodigen DFB-QC-Laser zusammengefasst. Das linke Teilbild zeigt dabei die Emissionswellenlänge als Funktion der DFB-Gitterperiode. Im rechten Teilbild sind die Absorptionslinienstärken der Rotations-Schwingungs-Banden von NO, CO und N_2O dargestellt. Der direkte Vergleich der realisierten Emissionswellenlängen mit den molekularen Absorptionslinien verdeutlicht, dass diese DFB-QC-Laser in hohem Maße für die quantitative Bestimmung der oben genannten Moleküle geeignet sind.

Die am IAF realisierten QC-Laser wurden vom Fraunhofer IPM und anderen Verbundpartnern erfolgreich in der hochauflösenden Spurengasanalytik eingesetzt. Dabei wurde ein TDLAS

(MOVPE), while the lower cladding was formed by the InP substrate. After the MOVPE growth step mesa waveguide lasers with ridge widths between 7 and 34 μm were fabricated by optical lithography and chemically assisted ion beam etching (CAIBE).

Using the above described growth and processing technologies, DFB QC lasers were fabricated at Fraunhofer IAF for the detection of NO and CO, respectively. Fig. 1 shows temperature-dependent pulsed (100 ns pulse length, 5 kHz repetition rate) lasing spectra of a DFB QC laser designed for CO detection. The laser with uncoated facets was mounted substrate-side down. The lasing spectra show clear single-mode operation over the whole temperature range (280 – 400 K) with a side-mode suppression ratio (SMSR) > 27 dB. The temperature tuning coefficient of the emission frequency is $-0.153 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$. Temperature-dependent output power-vs.-current (P-I) characteristics are displayed in Fig. 2 together with the 300 K voltage-vs.-current (V-I) characteristic. Operating conditions were 100 ns pulse length and a repetition rate of 1 kHz. The maximum peak power is 600 mW at 280 K, dropping to still convincing 140 mW at 400 K. Achieved operating temperatures, output power, SMSR, and temperature tunability all fulfill, or even surpass, the requirements for high-resolution laser-based gas spectroscopy.

Fig. 3 summarizes the wavelengths covered by DFB QC lasers realized at Fraunhofer IAF during the QUANKAS project. The left panel shows the different lasing wavelengths plotted versus the DFB grating period, revealing a linear dependence as expected for a constant effective mode refractive index. The right panel displays the absorption line strength of the vibrational-rotational bands of NO, CO, and N_2O , sharing a common wavelength axis with the left panel. This direct side-by-side comparison of lasing wavelengths realized and molecular absorption lines shows clearly that our DFB QC lasers are ideally suited for the quantitative detection of the above three chemical species.

Our QC lasers have been used successfully by Fraunhofer IPM and other project partners for high sensitivity trace gas sensing experiments. Using QC lasers operated at room-temperature in pulsed mode, a tunable diode laser absorption (TDLAS) measurement system has been realized which shows superior system performance in terms of long-term stability, as compared to state-of-the-art systems using cw-operated cryogenically cooled lead-chalcogenide diode lasers. As an example Fig. 4 shows the measured CO concentration in a multi-pass gas cell with a 2.4 m optical path length and a volume of 125 ml versus measurement time. At the beginning and the end, the CO concentration was increased and decreased step-wise, while in the middle of the experiment the concentration was kept constant at a level of 40 ppmv for 8 hours. The measured CO concentration exhibits a minor linear drift of only 1.3 ppmv per 8 hours, which attests excellent long-term stability of the QC laser as well as of the whole measurement set-up.

Future directions for further improvements in QC laser technology will be, firstly, to increase the maximum cw operating temperature to room-temperature or even higher, and, secondly, to decrease the minimum operating wavelength for practical QC laser. The first goal is a prerequisite for straight forward implementation of a QC laser in an external cavity set-up as well as for the use of cw laser-based measurement procedures. To achieve this, the threshold current at room-temperature has to be reduced further by, e. g., appropriate adjustment of the doping concentrations in the active region as well as by improved heat extraction from the active region via, e. g., a thick electroplated gold layer. To realize the second goal, the GaInAs quantum wells have to be surrounded by a larger conduction band offset barrier material than AlInAs. AlAsSb or AlGaAsSb, which both can be grown lattice matched to InP, are ideal candidates, and first prototypes of a $\lambda < 5 \mu\text{m}$ GaInAs/AlAsSb-on-InP QC laser show indeed a very promising roomtemperature performance in pulsed operation.

(tunable diode laser absorption spectroscopy)-Gasanalyse-System realisiert, das als Lichtquelle einen bei Raumtemperatur gepulst betriebenen QC-Laser verwendet. Dieses zeigt sich verglichen mit Messsystemen, die kryogen gekühlte konventionelle Bleisalzlaser im Dauerstrichbetrieb verwenden, hinsichtlich der erreichten minimalen Nachweisgrenze und Langzeitstabilität überlegen. Als Beispiel zeigt Abb. 4 die gemessene CO-Konzentration in einer Vielfachreflexionszelle mit einer optischen Weglänge von 2,4 m und einem Volumen von 125 ml als Funktion der Zeit. Zu Beginn und am Ende der Messung wurde die CO-Konzentration schrittweise erhöht bzw. verringert. Dazwischen wurde sie für 8 Stunden bei 40 ppmv konstant gehalten. Die Messung der CO-Konzentration zeigt eine nur geringfügige Zunahme um 1,3 ppmv innerhalb dieser 8 Stunden. Dieses Resultat spiegelt die exzellente Langzeitstabilität des eingesetzten QC-Lasers und des gesamten Messsystems wider.

Zukünftige Verbesserungen der QC-Laser-Technologie zielen sowohl auf die Erhöhung der maximalen Betriebstemperatur im Dauerstrichmodus bis auf Raumtemperatur oder darüber als auch auf die Verringerung der minimalen Emissionswellenlänge. Die Erhöhung der maximalen Betriebstemperatur im Dauerstrichmodus ist dabei eine Voraussetzung für den direkten Einsatz von QC-Lasern in einem externen Resonator und die Verwendung von Messverfahren, die auf dem Dauerstrichbetrieb basieren. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Schwellenstrom bei Raumtemperatur weiter verringert werden. Dazu kann beispielsweise die Dotierung in den Injektoren optimiert und die Abfuhr der im Bauelement erzeugten Verlustwärme, z. B. durch das galvanische Aufbringen dicker Goldschichten, verbessert werden. Zur Verringerung der minimalen Emissionswellenlänge müssen die GaInAs-Quantenfilme durch Barrieren aus einem Halbleiter umgeben werden, für den sich eine größere Leitungsbanddiskontinuität als für AlInAs ergibt. Geeignete Materialien sind AlAsSb oder AlGaAsSb, die gitterangepasst auf InP-Substrate aufgewachsen werden können. Der erste Prototyp eines GaInAs/AlAsSb/InP-basierten QC-Lasers mit $\lambda < 5 \mu\text{m}$ zeigt im Pulsbetrieb bei Raumtemperatur äußerst vielversprechende elektrooptische Eigenschaften.

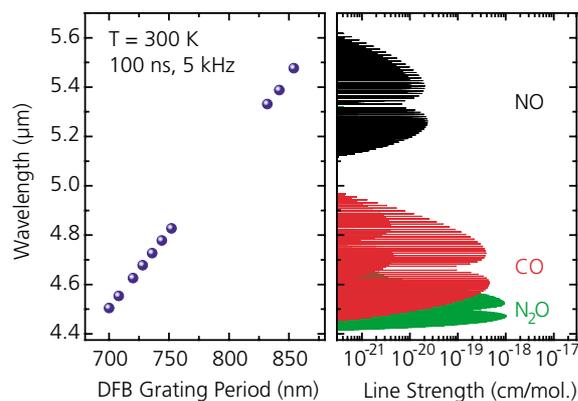


Fig. 3: Room-temperature single-mode emission wavelengths of various DFB QC lasers versus DFB grating period (left). Line strength versus wavelength of CO, NO, and N₂O calculated from the HITRAN96 database (right).
Abb. 3: Emissionswellenlängen verschiedener einmodiger DFB-QC-Laser als Funktion der DFB-Gitterperiode (links). Nach HITRAN96 berechnete Linienstärken von CO, NO und N₂O als Funktion der Wellenlänge (rechts).

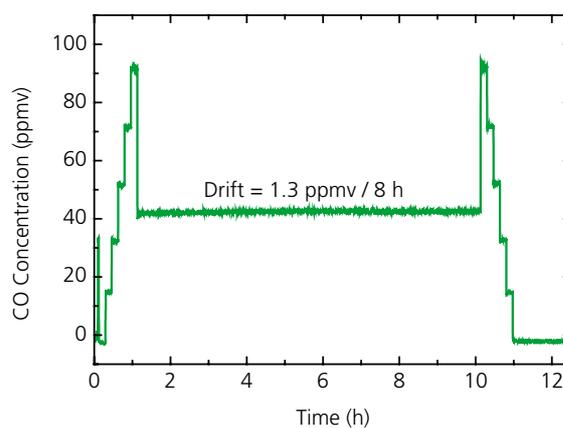


Fig. 4: CO concentration measured by pulsed QC laser TDLAS set-up vs. time, indicating excellent long-term stability of QC laser and measurement system (data courtesy of Fraunhofer IPM).
Abb. 4: Quantitative Messung von CO mit einem TDLAS-Gasanalyse-System, das einen gepulst betriebenen QC-Laser verwendet. Die detektierte CO-Konzentration als Funktion der Zeit spiegelt die exzellente Langzeitstabilität des QC-Lasers und des Messsystems wider (in Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM).



Tunable Infrared Diode Lasers for Diagnostics

Joachim Wagner
Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 52
joachim.wagner@iaf.fraunhofer.de

Spectroscopic detection of species in liquid solution, as required e. g. for the non-invasive monitoring of metabolites in medical diagnostics, calls for compact and robust laser sources which can be tuned over a significant fraction of their center wavelength. This requirement arises from the substantial broadening of the rotational-vibrational transition of the molecule under investigation when dissolved in e. g. water, combined with the possibility of strongly overlapping absorption lines which have to be de-convoluted when several solutes are present.

For non-invasive medical diagnostics, the 2.0 – 2.4 μm wavelength range is of particular interest as, firstly, human tissue is partially transparent in this wavelength interval, and, secondly, relevant metabolites, such as glucose, have sufficiently strong absorption bands in this spectral window. Diode lasers based on a GaInAsSb/AlGaAsSb quantum well (QW) active region, grown by molecular-beam epitaxy on n-GaSb substrates are well suited for this wavelength range. They can be operated in cw mode at and even above room-temperature and broad area lasers have already shown output powers exceeding 1 W with a maximum power efficiency of 25 %.

To achieve a wavelength tuning range of over 100 nm, as required for the above applications, the laser diode has to be placed into an external cavity which provides wavelength-selective feedback to the actual laser chip. Spectral selectivity and tunability can be achieved e. g. by using a grating as a wavelength-dependent back-reflector, which can be rotated for wavelength tuning.

Fig. 1 shows such an external cavity laser (ECL) in Littrow configuration, i. e. the first order diffracted light from the grating is coupled back into the laser cavity. To maximize the wavelength tuning range, optical coupling between the narrow ridge-waveguide semiconductor laser and the external cavity has to be optimized. One factor entering this optimization is the residual reflectivity of the diode laser facet facing the grating, which has to be minimized. A second factor is the collimation of the highly divergent output beam from the laser chip, which requires a large f-number lens system. By the optimiza-

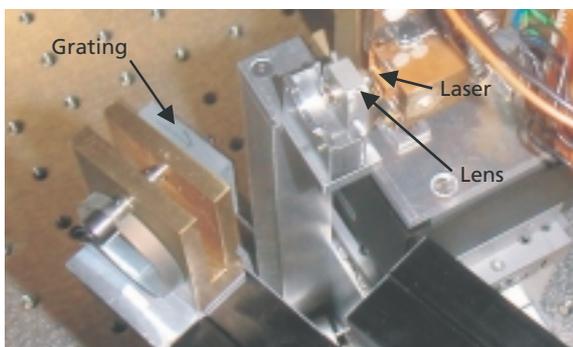
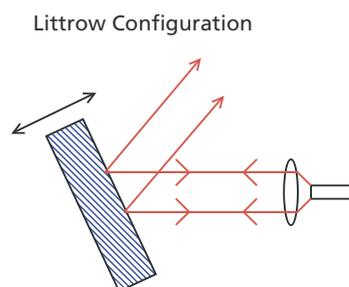


Fig. 1: Photograph of an external cavity diode laser system in Littrow configuration for the 2.X μm wavelength range.
Abb. 1: Foto eines Diodenlasers für den Wellenlängenbereich 2,0 – 2,3 μm in einem externen Resonator in sog. Littrow-Anordnung.

Durchstimmbare Infrarot-Diodenlaser für die Diagnostik

Für den spektroskopischen Nachweis chemischer Verbindungen in Flüssigkeiten, wie z. B. für die nichtinvasive Diagnostik von Blutbestandteilen erforderlich, werden kompakte und robuste Laserquellen benötigt, die über einen größeren Wellenlängenbereich hinweg abstimbar sind. Diese Anforderung rührt von der deutlichen spektralen Verbreiterung der Rotations-Schwingungs-Übergänge der in flüssiger Lösung befindlichen Moleküle her. Weiterhin ist es erforderlich, z. T. stark überlappende Absorptionsbanden voneinander zu trennen, wenn sich mehrere Substanzen in der Lösung befinden.

Für die nichtinvasive medizinische Diagnostik ist der Wellenlängenbereich zwischen 2,0 und 2,4 μm von besonderem Interesse, da zum einen das menschliche Gewebe in diesem Bereich ein relatives Transmissionsmaximum aufweist und zum anderen charakteristische Absorptionsbanden relevanter Blutbestandteile in diesem Wellenlängenintervall liegen. Diodenlaser auf der Basis von $\text{GaInAsSb}/\text{AlGaAsSb}$ -Quantenfilmen, die mittels Molekularstrahl-Epitaxie auf n-leitende GaSb -Substrate aufgewachsen werden können, sind für diesen Wellenlängenbereich geeignete Laserquellen. Diese können im Dauerstrichmodus bis zu Temperaturen weit oberhalb von Raumtemperatur betrieben werden und weisen bei Raumtemperatur maximale Ausgangsleistungen von mehr als 1 W sowie eine maximale Leistungseffizienz von 25 % auf.

Um einen spektralen Durchstimmbereich von mehr als 100 nm, wie für die oben genannte

Anwendung erforderlich, zu erreichen, muss der Diodenlaser mit einem externen Resonator versehen werden. Dieser sorgt für eine wellenlängenabhängige Rückkopplung in den Diodenlaser. Als wellenlängenselektives Element kann z. B. ein optisches Beugungsgitter verwendet werden, welches als wellenlängenabhängiger Rückreflektor dient und zum Durchstimmen der Wellenlänge gedreht werden kann.

Abb. 1 zeigt einen solchen Diodenlaser im externen Resonator in der sog. Littrow-Anordnung, in welcher das in die erste Ordnung gebeugte Licht in den Diodenlaser zurückgekoppelt wird. Um den spektralen Durchstimmbereich zu maximieren, muss die optische Kopplung zwischen dem Diodenlaser und dem externen Resonator optimiert werden. Ein dieser Kopplung bestimmender Faktor ist die Reflektivität der dem Beugungsgitter zugewandten Laserfacette, welche zu minimieren ist. Ein weiterer Faktor stellt die für die Kollimation der stark divergenten Emission des Diodenlasers verwendeten Sammeloptik dar. Hier ist ein kurzbrennweitiges Linsensystem mit einer möglichst großen Apertur in Kombination mit Diodenlasern möglichst geringer Strahldivergenz wünschenswert. Durch eine ausgewogene Optimierung der vertikalen Wellenleiterstruktur einerseits und der Dotierprofile zur Minimierung der Absorptionsverluste andererseits ist es gelungen, die Strahldivergenz der hier interessierenden Diodenlaser von 120° voller Breite bei $1/e^2$ auf 77° zu reduzieren und gleichzeitig die sonstigen elektrooptischen Kenndaten zu erhalten.

tion of this lens system and the simultaneous reduction of the fast axis beam divergence of the laser a significant improvement in coupling efficiency was achieved, resulting in an almost doubled wavelength tuning range. The beam divergence was reduced from 120° to 77° full width at 1/e² maximum by a judicious compromise between optical cavity dimension and absorption loss, i. e. doping level in the cladding layers.

Normalized lasing spectra recorded for different grating positions are displayed in Fig. 2, while Fig. 3 shows the peak lasing wavelength plotted versus the grating tuning angle. A tuning range of $\Delta\lambda = 130$ nm around a center wavelength of $\lambda_0 = 2275$ nm has been achieved at a constant heat sink temperature of 293 K and an injection current of 100 mA. This corresponds to a relative tuning range of $\Delta\lambda/\lambda_0 = 5.7$ %, limited by the width of the gain spectrum which is shown in

Fig. 2 as obtained from a room-temperature sub-threshold electroluminescence spectra. To improve on that further, designs of the QW active region with larger QW widths, and thus reduced subband spacing, will have to be employed. This will allow excited state lasing in an ECL configuration and make a tuning range in excess of 200 nm, or a $\Delta\lambda/\lambda_0$ approaching 10 %, feasible.

Very recently, Fraunhofer IAF has acquired an industry funded R&D project for the development of a non-invasive metabolite monitoring system based on the above described tunable infrared diode laser system. Main research partner in this project is the group of Benedikt Jean at the Ophthalmic Hospital of Tübingen University. Prime goal of the work at Fraunhofer IAF is to develop and provide a diode laser system optimized and adapted for this particular application.

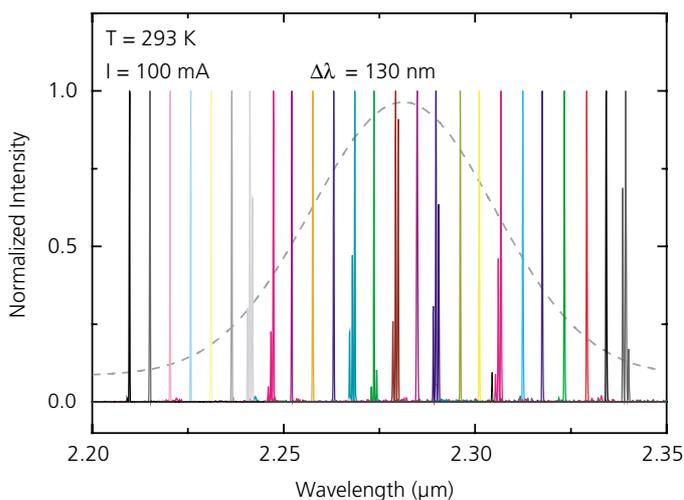


Fig. 2: Normalized lasing spectra proving a 130 nm tuning range at a center wavelength of 2275 nm achieved with the ECL set-up shown in Fig. 1.

Abb. 2: In ihrer Intensität normierte Laserspektren des in Abb. 1 gezeigten Diodenlasers im externen Resonator. Der Durchstimmbereich beträgt 130 nm bei einer Zentralwellenlänge von 2275 nm.

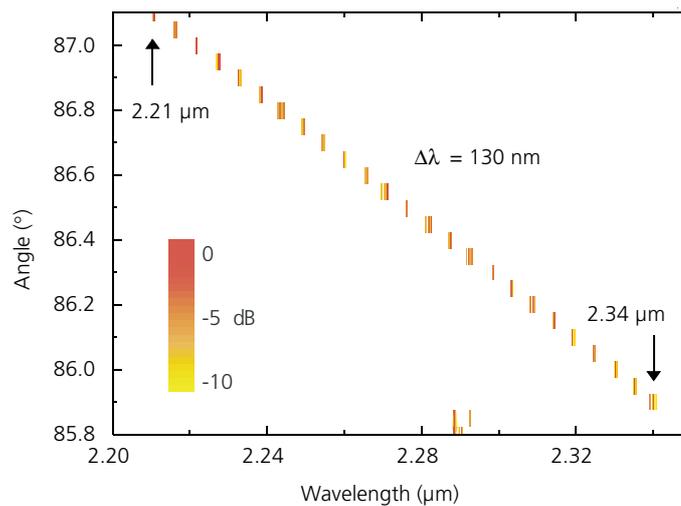
In der Signalhöhe normierte Laserspektren, aufgenommen bei verschiedenen Stellungen des Beugungsgitters, sind in Abb. 2 dargestellt. Abb. 3 zeigt die Emissionswellenlänge als Funktion der Gitterstellung. Für eine konstante Temperatur der Wärmesenke von 293 K und einen Injektionsstrom von 100 mA ergibt sich ein Durchstimmbereich von $\Delta\lambda = 130$ nm bei einer Zentralwellenlänge von $\lambda_0 = 2275$ nm. Dies entspricht einem relativen Durchstimmbereich von $\Delta\lambda/\lambda_0 = 5,7$ %, welcher durch die Breite des Gewinnspektrums begrenzt ist. Zur Veranschaulichung des Gewinnspektrums ist in Abb. 2 zusätzlich das Elektrolumineszenzspektrum des Diodenlasers, aufgenommen bei Raumtemperatur unterhalb der Laserschwelle, dargestellt. Zur weiteren Vergrößerung des Durchstimmbereichs wird es erforderlich sein, Quantenfilme größerer Breite, und damit verknüpft mit einem reduzier-

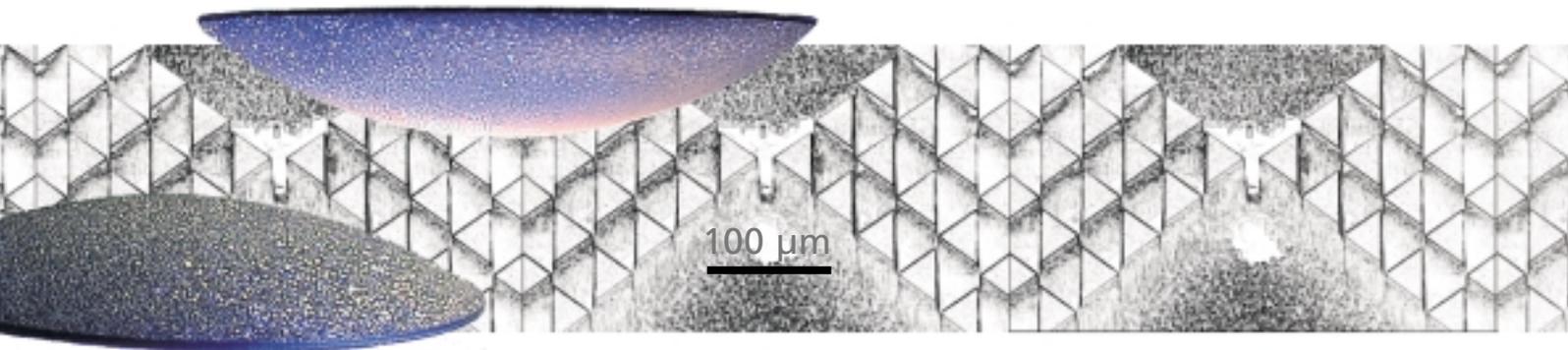
ten Subbandabstand, als aktiven Bereich zu verwenden. Diese Modifikation dient dazu, im externen Resonator auch Lasertätigkeit über angeregte Quantenzustände zu erreichen, womit ein Durchstimmbereich von mehr als 200 nm ($\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 10$ %) möglich sein sollte.

In jüngster Zeit ist es dem Fraunhofer IAF gelungen, ein durch die Industrie finanziertes FuE-Vorhaben zur nichtinvasiven Analyse von Blutbestandteilen einzuwerben. Das Analyseverfahren basiert auf den oben beschriebenen durchstimmbaren Infrarot-Diodenlasern, welche vom IAF für dieses Vorhaben weiter optimiert und an die speziellen Anforderungen dieser Anwendung angepasst werden. Hauptpartner bei diesem Vorhaben auf der Forschungsseite ist die Gruppe von Benedikt Jean an der Universitäts-Augenklinik in Tübingen.

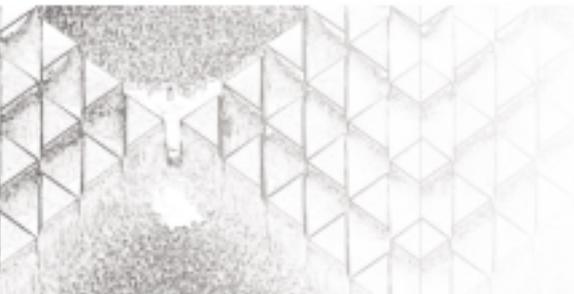
Fig. 3: Peak lasing wavelength vs. grating angle for the ECL set-up shown in Fig. 1. Mode intensities are color-coded.

Abb. 3: Laserwellenlänge als Funktion der Gitterstellung für den in Abb. 1 gezeigten Diodenlaser im externen Resonator. Die Intensitäten der Laserlinien sind farbkodiert dargestellt.





CVD Diamond Diamantscheiben



The unique properties of diamonds, its unequalled hardness, its transparency over wide spectral range and its outstanding thermal conductivity are characteristics of large, thick synthetic diamond layers, which are deposited by chemical vapor deposition (CVD). Our proprietary CVD microwave reactors guarantee homogeneous and reproducible diamond layers.

Die einmaligen Eigenschaften des Diamants – seine Härte, seine Transparenz und seine hohe Wärmeleitfähigkeit – werden technisch genutzt mit großflächigen, dicken synthetischen Diamantscheiben, die wir mit einem chemischen Abscheidungsverfahren (Chemical Vapor Deposition CVD) herstellen. Unsere patentierten CVD-Mikrowellen-Reaktoren garantieren homogene und reproduzierbare Diamantschichten.

Applications

- windows for high-power lasers and microwave tubes
- highly refractive microoptics
- dielectric substrates for microelectronics
- heat spreaders for micro- and optoelectronic applications
- dressing tools

Anwendungen

- Fenster für Leistungslaser und Mikrowellenröhren
- hochbrechende Mikrooptiken
- dielektrische Substrate für die Elektronik
- Wärmespreizer für elektronische und optoelektronische Bauelemente
- Einsatz für Schneidwerkzeuge

Christoph Wild
 Tel.: +49 (0) 7 61 / 51 59-3 57
 christoph.wild@iaf.fraunhofer.de

The chemical vapor deposition of diamond has opened up a variety of new applications of this extraordinary material. In the following, examples of optical applications in different regions of the electromagnetic spectrum will be described. These applications take advantage of the specific properties of CVD diamond as shown in Fig. 1.

ATR Spectroscopy

Attenuated total reflection (ATR) spectroscopy is a technique used to measure the infrared spectroscopic properties of liquids and solids. An infrared beam is guided through an optical waveguide which is in close contact with the sample under investigation. The evanescent wave leaking from the waveguide penetrates into the sample and is partially absorbed. A CVD diamond ATR insert has been developed with a saw tooth base structure allowing effective coupling of the infrared beam into the waveguide (Fig. 2). With this approach the optical path length of the IR beam can be kept short within the waveguide while maintaining a large sampling area. This application takes advantage of the broadband transparency, the high refractive index of 2.4 and – especially for measuring abrasive powder samples – the hardness of diamond.

IR Windows for Synchrotron Beamlines

Over the past years a large number of synchrotrons have been set up worldwide as intensive light sources for scientific applications. The radiation covers the entire electromagnetic spectrum from X-rays to the far infrared. This technique has raised a demand for infrared windows mounted in UHV tight vacuum flanges. The requirements are broadband transparency and the suppression of interference oscillations. At Fraunhofer IAF a soldering technique for the preparation of diamond-metal joints has been developed. The mounted windows can be annealed at temperatures as high as 250 °C. They exhibit flat surfaces and a wedge of one degree to suppress interference oscillations. Our UHV tight diamond windows as shown in Fig. 3 are successfully applied in several synchrotron infrared beamlines in France, Italy, and the USA.

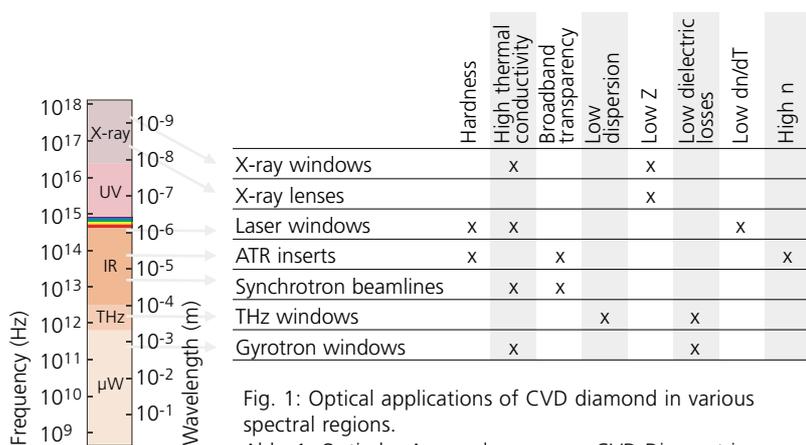


Fig. 1: Optical applications of CVD diamond in various spectral regions.
 Abb. 1: Optische Anwendungen von CVD-Diamant in verschiedenen Spektralbereichen.

Die Gasphasenabscheidung von Diamant erlaubt die Herstellung dieses außergewöhnlichen Materials mit großen Flächen und Dicken bis in den mm-Bereich und eröffnet somit eine Vielzahl neuer Anwendungen. Im Folgenden werden Beispiele optischer Anwendungen von CVD-Diamant vorgestellt, wobei der Spektralbereich eine große Spanne umfasst – von der Röntgenstrahlung über das Sichtbare und Infrarote bis in den Terahertz- und Mikrowellenbereich. Diese Anwendungen nutzen eine oder mehrere der vorteilhaften Materialeigenschaften von Diamant (Abb. 1).

ATR-Spektroskopie

ATR-Spektroskopie (Attenuated Total Reflection) ist eine Technik zur spektroskopischen Charakterisierung von flüssigen und festen Proben. Hierzu wird ein Infrarotstrahl durch einen Wellenleiter geführt, der sich im Kontakt mit der zu analysierenden Probe befindet. Die geführte Welle dringt bei der Totalreflexion partiell in das angrenzende Medium ein und wird dort teilweise absorbiert. Als ATR-Strukturen werden meist Prismen (für eine Reflexion) oder Wellenleiter (für mehrfache Reflexion) eingesetzt. Es wurde ein ATR-Einsatz aus CVD-Diamant entwickelt mit einer sägezahnförmigen Struktur, die eine effiziente Einkopplung des Lichtes in die Wellenleiterstruktur erlaubt (Abb. 2). Mit diesem Ansatz kann die optische Weglänge der Strahlung im Wellenleiter kurz gehalten werden bei gleichzeitig großer Probenoberfläche für das zu analysierende Material. Das Diamant-ATR-Modul verbindet eine Reihe von Vorteilen gegenüber üblichen Materialien, wie z. B. Germanium: Die breitbandige Transparenz eröffnet einen weiten Spektralbereich für die ATR-Spektroskopie, der große Brechungsindex von 2,4 erlaubt auch die Charakterisierung von hochbrechenden Materialien, und die Härte ist von Vorteil insbesondere bei abrasiven Pulverproben.

IR-Fenster für Synchrotronstrahlung

In den letzten Jahren wurden weltweit eine große Zahl von Elektronensynchrotrons installiert, die als intensive und spektral breitbandige Lichtquellen vom Röntgenbereich bis in das ferne IR für wissenschaftliche Anwendungen Einsatz finden. Für diese Großgeräte ergibt sich ein Bedarf für stabile, multispektral transparente und in UHV-Flansche eingebaute Strahlungsfenster. Die Anforderungen sind breitbandige Transparenz und die Unterdrückung von Schichtdickeninterferenzen, die besonders im langwelligen IR stören.

Am Fraunhofer IAF wurde eine Löttechnik für haltbare Diamant-Metall-Verbindungen entwickelt, womit Diamant-UHV-Fenster realisiert werden konnten. Die Fenster besitzen optisch ebene Oberflächen, sie können bis 250 °C ausgeheizt werden, und ein Keilwinkel von 1° unterdrückt Interferenzoszillationen. Abb. 3 zeigt ein UHV-dichtes Diamantfenster mit einem freien Durchmesser von 40 mm, das erfolgreich an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble eingesetzt wird. Weitere Synchrotron-IR-Strahllinien in Frankreich, Italien und den USA verwenden inzwischen die Diamantfenster des Fraunhofer IAF.

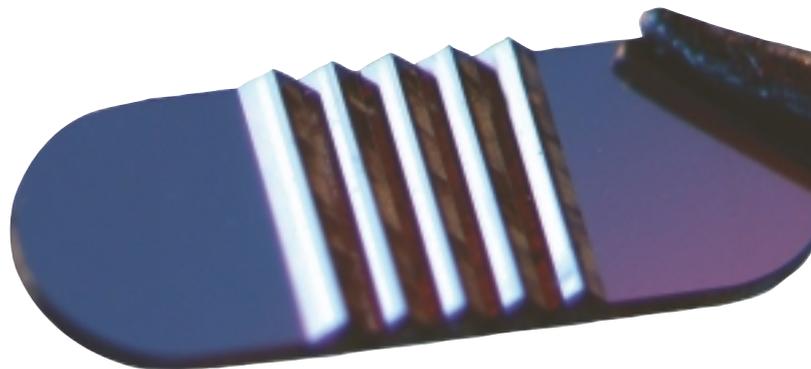


Fig. 2: Diamond waveguide for ATR spectroscopy.
Abb. 2: Diamant-Lichtleiter für die ATR-Spektroskopie.

Windows for THz Radiation

In the context of homeland security THz radiation, in particular THz imaging, has found considerable interest. A problem related to THz radiation is the fact that many infrared optical materials exhibit strong dispersion in this frequency regime. As a result THz pulses generated with femto-second laser excitation are strongly disturbed when passing through an optical window or lens. In cooperation with the University of Freiburg, the THz dielectric properties of CVD diamond have been investigated using time domain spectroscopy with femto-second pulses. The measurements (Fig. 4) confirm that CVD diamond does not exhibit any absorption or dispersion in this frequency regime. Diamond windows and lenses are therefore of interest for THz applications.

Antireflection

For many applications, including high-power laser windows, antireflection is an important issue. Two approaches have been realized at Fraunhofer IAF: Classical dielectric layers and the moth-eye patterning of the diamond surface (Fig. 5). For the dielectric layer a combination of ThF_4 and ZnSe has been applied. The moth-eye structure was prepared using lithographic techniques in combination with reactive ion etching. The latter was performed by GFD GmbH in Ulm. While dielectric AR coatings do provide good narrow band performance, e. g. for laser applications, the binary optical approach offers broadband AR action without degrading the hardness of diamond by any soft coating (Fig. 6).

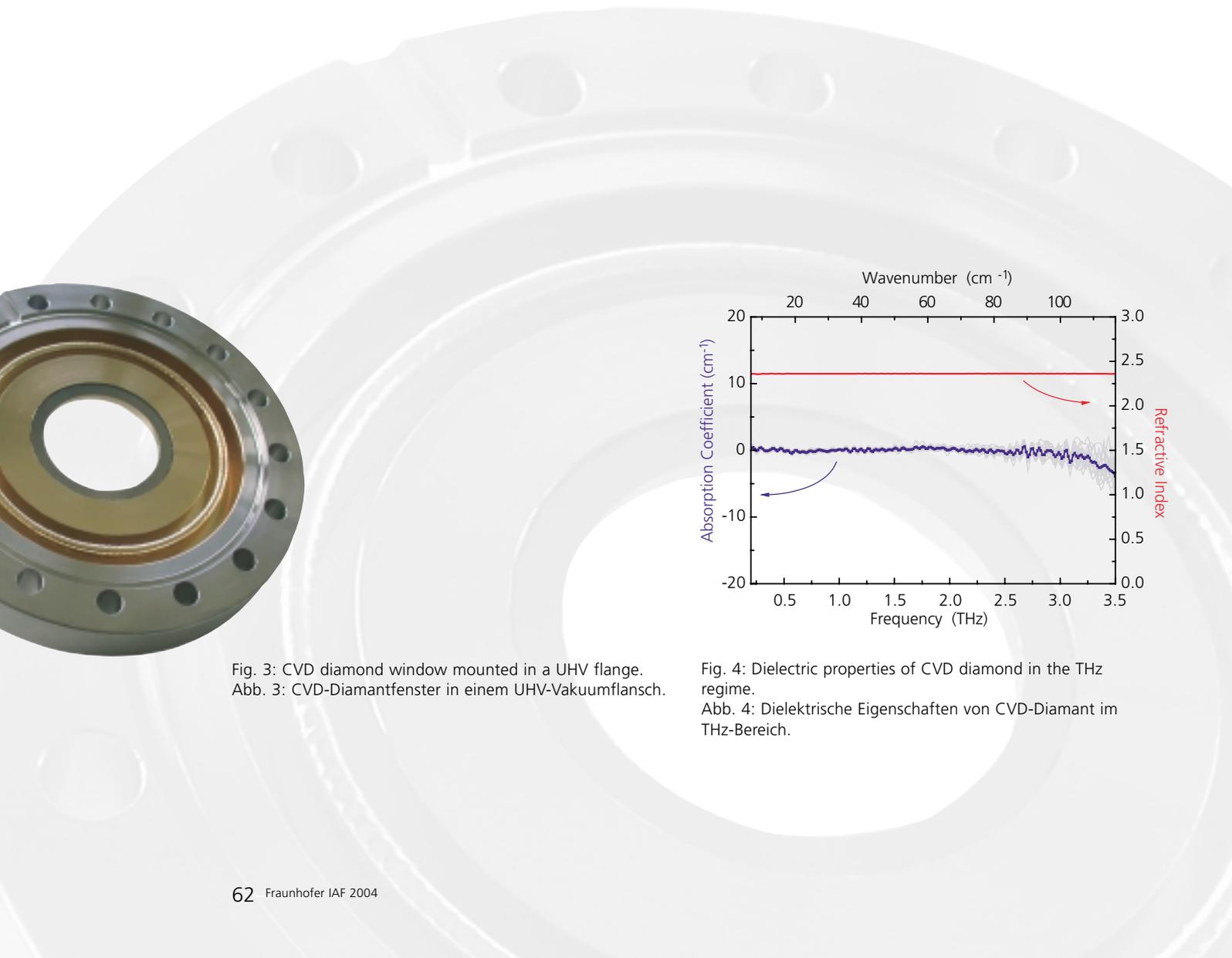


Fig. 3: CVD diamond window mounted in a UHV flange.
Abb. 3: CVD-Diamantfenster in einem UHV-Vakuumflansch.

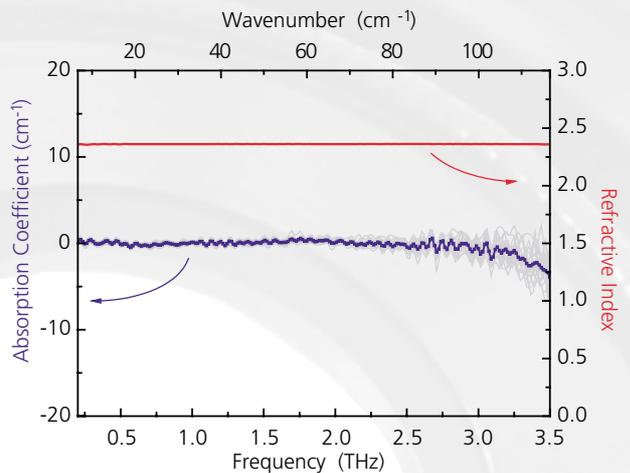


Fig. 4: Dielectric properties of CVD diamond in the THz regime.
Abb. 4: Dielektrische Eigenschaften von CVD-Diamant im THz-Bereich.

Optiken für Terahertzstrahlung

Terahertzstrahlung gewinnt zunehmende Bedeutung für die bildgebende Radiometrie, insbesondere von sicherheitsrelevanten Szenarien. Infraroptische Materialien zeigen oft eine erhebliche Dispersion im THz-Bereich. Terahertz-Pulse, die durch Femtosekunden-Laseranregung erzeugt wurden, werden deshalb beim Durchgang durch optische Komponenten wie Fenster und Linsen oft stark gestört. In Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg wurden die dielektrischen Eigenschaften von CVD-Diamant im THz-Bereich mittels Zeitdomänenspektroskopie charakterisiert. Die Untersuchungen bestätigen, dass CVD-Diamant weder Absorption noch Dispersion in diesem Frequenzbereich aufweist (Abb. 4) und somit für die Realisierung von neutralen optischen Komponenten für den Terahertzbereich sehr geeignet ist.

Reflexionsminderung

Für viele optische Anwendungen ist eine Reflexionsunterdrückung unverzichtbar. Am Fraunhofer IAF wurden zwei Ansätze zur Entspiegelung von Diamantoberflächen verfolgt: klassische dielektrische Beschichtungen und eine binär-optische »Mottenaugen«-Strukturierung der Oberfläche. Für die dielektrische AR-Beschichtung wurden ThF_4 und ZnSe eingesetzt. Die Mottenaugenstrukturen (Abb. 5) wurden in Kooperation mit der Firma GFD in Ulm durch lithografische Techniken und Ionenätzen hergestellt. Wie Abb. 6 zeigt, ergibt die dielektrische Vergütung eine gute Schmalband-AR-Wirkung und ist somit für Laseranwendungen geeignet. Die binäroptische Vergütung bietet den Vorteil einer breitbandigen Antireflexwirkung, ohne dass die Härte der Diamantoberfläche durch eine weiche Beschichtung degradiert wird.

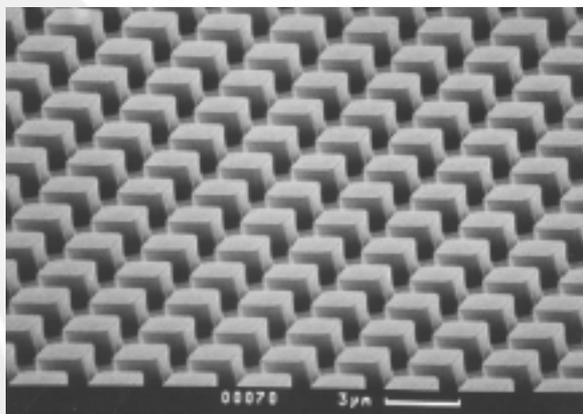


Fig. 5: Moth-eye patterned diamond surface for antireflection in the infrared.

Abb. 5: Mottenaugenstruktur für die Entspiegelung von CVD-Diamant.

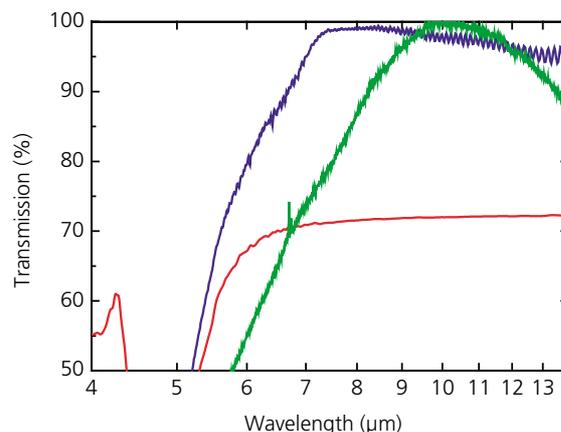


Fig. 6: Transmission spectrum of CVD diamond in the infrared: without coating (red), with dielectric coating (green) and with moth-eye patterned surface (blue).

Abb. 6: Infrarottransmission von CVD-Diamant: unbeschichtetes Fenster (rot), mit dielektrischer Beschichtung (grün), mit Mottenaugenstruktur (blau).

X-Ray Lenses

In the past it was common opinion that refractive lenses are hardly possible for X-rays because the refractive index of all materials is close to unity. However, by using low absorption materials (low atomic number) in combination with sophisticated lens designs it is possible to prepare X-ray lenses exhibiting reasonable refractive power. CVD diamond X-ray lenses were designed and prepared in cooperation with the University of Uppsala, Sweden, and GFD GmbH, Ulm. The lens design consists of an array of diamond prisms, each around 20 μm in size (Fig. 7). Thus diamond with a refractive index of 0.9999982 at X-ray energies of 5 – 30 keV and the higher refractive air ($n = 1$) are suitably distributed over the X-ray cross section. The lens has a maximized refractive power with minimized X-ray path length within the diamond material. This was demonstrated by measurements performed at the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble.

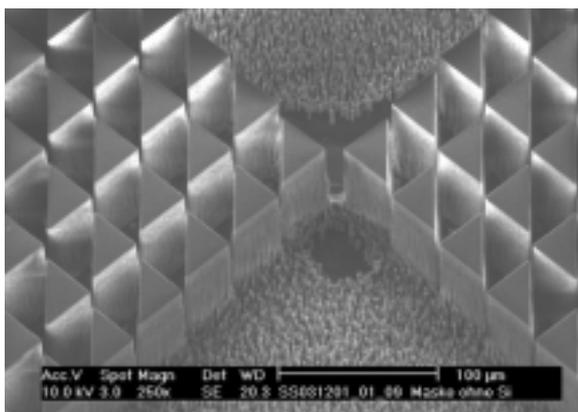


Fig. 7: SEM image of a CVD diamond X-ray lens (section view).
Abb. 7: REM-Aufnahme einer Röntgenlinse aus CVD-Diamant (Ausschnitt).

X-Ray Anodic Windows

In cooperation with Feinfocus GmbH, Garbsen, X-ray anodic windows have been developed. They consist of a CVD diamond disk coated with tungsten and soldered in a metallic frame. An electron beam impinging on this tungsten film generates X-ray radiation, which leaves the X-ray tube through the diamond window. The diamond window acts in two ways: it dissipates the heat generated by the electron beam and it acts as an exit window for the X-ray radiation. These X-ray tubes are used for the inspection (Fig. 8) of small objects such as integrated circuits. For this purpose the object under investigation is placed in close contact to the diamond window, i. e. in direct vicinity to the point where the radiation is generated. The X-rays passing through the object are collected at a much larger distance resulting in a large magnification factor. By using diamond instead of beryllium the tubes can be operated at higher power levels with a smaller focal spot size.

Commercial Exploitation

Some of the applications of CVD diamond have reached a mature state of development. Therefore a spin-off company »Diamond Materials GmbH« has been started in 2004 for the commercial exploitation of R&D results obtained at the Institute. This spin-off will work in close cooperation with Fraunhofer IAF.

Röntgenlinsen

Refraktive Linsen für Röntgenstrahlung sind mit konventionellen Methoden kaum zu realisieren, da der Brechungsindex aller Materialien sehr nahe bei eins liegt. Mit niedrig absorbierenden Materialien (niedrige Ordnungszahl) und ausgefeiltem Linsenentwurf ist es jedoch möglich, Röntgenlinsen zu entwerfen. In Kooperation mit der Universität Uppsala, Schweden, und GFD, Ulm, wurden am IAF Röntgenlinsen entwickelt. Die Linse besteht aus einem Feld von Diamantprismen von jeweils 20 µm Größe (Abb. 7). Diamant mit einem Brechungsindex von 0,9999982 für Röntgenenergien von 5 – 30 keV und die höher brechende Luft ($n = 1$) werden so über den Strahlquerschnitt verteilt, dass sich eine Fokussierung ergibt. Die Linse hat maximale Brechkraft mit minimalem Weg durch das Diamantmaterial. Die Eignung der Linse wurde durch Messungen am ESRF, Grenoble, bestätigt.

Transparente Röntgenanoden

In Zusammenarbeit mit Feinfocus GmbH, Garbsen, wurden Mikrofokus-Röntgenanoden entwickelt. Sie bestehen aus einem Wolframbeschichteten Diamantfenster, das in einen Metallrahmen eingelötet wurde. Das Diamantfenster hat hierbei eine zweifache Aufgabe. Es dissipiert die durch den Elektronenstrahl erzeugte Wärme und wirkt als Austrittsfenster für die Röntgenstrahlung. Solche Röntgenröhren werden für die Inspektion kleiner Objekte, wie z. B. integrierte Schaltkreise (Abb. 8) eingesetzt. Hierbei wird das Prüfobjekt in unmittelbarem Kontakt mit dem Diamantfenster und damit der Anode gebracht. Die Röntgenstrahlung wird auf einem entfernten Bildschirm detektiert, wo sich ein vergrößertes Bild ergibt. Die Verwendung von Diamant anstelle von Beryllium erlaubt höhere Elektronenströme und kleinere Fokusdurchmesser.

Wirtschaftliche Verwertung: Ausgründung

Einige Anwendungen von CVD-Diamant haben am Fraunhofer IAF mittlerweile einen hohen Reifegrad erreicht. Im September 2004 wurde deshalb die Firma Diamond Materials GmbH ausgründet, um die FuE-Ergebnisse des Institutes wirtschaftlich zu verwerten. Die neue Firma wird Diamantprodukte herstellen und dabei eng mit dem Institut zusammenarbeiten.

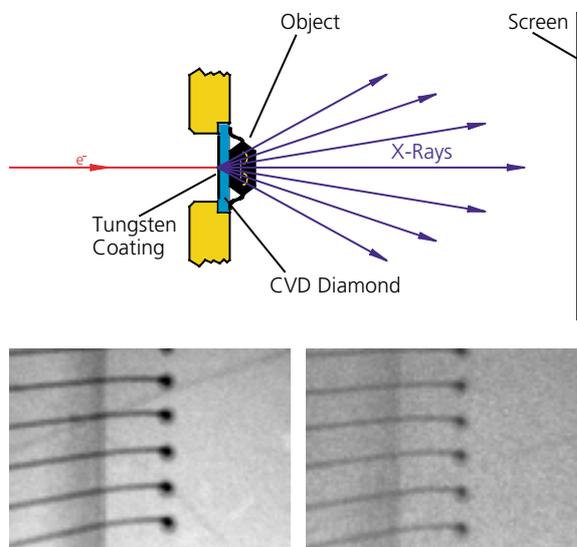


Fig. 8 – Top: Schematic of a X-ray inspection set-up. Bottom: X-ray image of gold bond wires located behind a 3 mm metal plate with diamond window (left) and beryllium window (right).
 Abb. 8 – Oben: Röntgeninspektionstechnik zur zerstörungsfreien Prüfung kleiner Objekte (schematischer Aufbau). Unten: Aufnahme von Gold-Bonddrähten hinter einer 3 mm starken Metallplatte mit Diamantfenster (links) und Berylliumfenster (rechts).

Publications, Conference Proceedings

Veröffentlichungen

- R. Aidam, R. Lösch, M. Walther, R. Driad, S. Kallenbach**
Multiwafer Solid Source Phosphorus MBE on InP for DHBTs and Aluminum Free Lasers
In: 2004 Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials
Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 342
- M. Dammann, A. Leuther, R. Quay, M. Meng, H. Konstanzer, W. Jantz, M. Mikulla**
Reliability of 70 nm Metamorphic HEMTs
Microelectronics Reliability **44** (2004), 939
- W. Cabanski, K. Eberhardt, W. Rode, J. Wendler, J. Ziegler, J. Fleißner, F. Fuchs, R. Rehm, J. Schmitz, H. Schneider, M. Walther
3rd Gen Focal Plane Array IR Detection Modules and Applications
In: Andresen, B. F. (ed.): Infrared Technology and Applications XXX. Bellingham, WA: SPIE, 2004, 184 (SPIE-Proceedings 5406)
SPIE Conf. on Infrared Technology and Applications XXX, Orlando, FL (USA)
12 – 16 Apr 2004
- M. Fiebig, T. Lottermoser, D. Fröhlich, S. Kallenbach
Phase-Resolved Second-Harmonic Imaging With Nonideal Laser Sources
Optics Letters **29** (2004), 41
- S. Kallenbach, M. T. Kelemen, R. Aidam, R. Lösch, G. Kaufel, M. Mikulla, G. Weimann**
High-Power High-Brightness Tapered Diode Lasers and Amplifiers for Eye-Safe Operation
In: LEOS 2004 – Annual Meeting. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 473
17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS, Rio Mar (PR)
7 – 11 Nov 2004
- M. T. Kelemen, J. Weber, S. Kallenbach, C. Pfahler, M. Mikulla, G. Weimann**
Astigmatism and Beam Quality of High-Brightness Tapered Diode Lasers
In: Lenstra, D. (ed.): Semiconductor Lasers and Laser Dynamics. Bellingham, WA: SPIE, 2004, 233 (SPIE-Proceedings 5452)
Photonics Europe 2004, Strasbourg (F)
26 – 30 Apr 2004
- K. Köhler, J. Wagner, P. Ganser, D. Serries, T. Geppert, M. Maier, L. Kirste**
Epitaxy and Characterisation of Dilute III-As_{1-y}N_y on GaAs and InP
IEEE Proceedings Optoelectronics **151** (2004), 247
E-MRS, Strasbourg (F)
24 – 28 May 2004
- K. Köhler, J. Wagner, P. Ganser, D. Serries, T. Geppert, T. Maier, L. Kirste**
The Realization of Long-Wavelength (Below 2.3 μm) Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}N_y Quantum Wells on InP by Molecular-Beam Epitaxy
Journal of Physics: Condensed Matter **16** (2004), S2995
- V. G. Lyssenko, J. M. Hvam, D. Meinhold, K. Köhler, K. Leo
Wave-Function Reconstruction in a Graded Semiconductor Superlattice
Applied Physics A **78** (2004), 441
- S. Nüsse, F. Wolter, P. Haring Bolivar, K. Köhler, R. Hey, H. T. Grahn, H. Kurz
Intraband Coherence of Bloch Oscillations After Momentum Scattering
Applied Physics A **78** (2004), 491
- M. Rösch, E. Batke, K. Köhler, P. Ganser
Optical and Acoustic Intersubband Plasmons
Europhysics Letters **63** (2004), 440
- D. Seliuta, E. Sirmulis, V. Tamosiunas, S. Balakauskas, S. Asmontas, A. Suziedelis, J. Gradauskas, G. Valusis, A. Lisauskas, H. G. Roskos, K. Köhler
Detection of Terahertz/Sub-Terahertz Radiation by Asymmetrically-Shaped 2DEG Layers
Electronics Letters **40** (2004), 631
- A. Juozapavicius, L. Ardaravicius, A. Suziedelis, A. Kozic, J. Gradauskas, J. Kundrotas, D. Seliuta, E. Sirmulis, S. Asmontas, G. Valusis, H. G. Roskos, K. Köhler
Microwave Sensor Based on Modulation-Doped GaAs/AlGaAs Structure
Semiconductor Science and Technology **19** (2004), S436
- D. Krausse, R. Quay, R. Kiefer, A. Tessmann, H. Massler, A. Leuther, T. Merkle, S. Müller, C. Schwörer, M. Mikulla, M. Schlechtweg, G. Weimann**
Robust GaN HEMT Low-Noise Amplifier MMICs for x-Band Applications
In: 12th European Gallium Arsenide & Other Compound Semiconductors Application Symposium. London: Horizon House, 2004, 71
European Microwave Week (EuMW), Amsterdam (NL)
11 –15 Oct 2004
- T. Maier, H. Schneider, M. Walther, P. Koidl, H. C. Liu**
Resonant Two-Photon Photoemission in Quantum-Well Infrared Photodetectors
Applied Physics Letters **84** (2004), 5162
- R. E. Makon, K. Schneider, R. Driad, M. Lang, R. Aidam, R. Quay, G. Weimann**
Fundamental Low Phase-Noise InP-Based DHBT VCOs With High Output Power Operating up to 75 GHz
In: 2004 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 159
2004 IEEE Compound Semiconductor IC Symposium, Monterey, CA (USA)
24 – 27 Oct 2004
- C. Mann, Q. K. Yang, F. Fuchs, W. Bronner, K. Köhler, T. Beyer, M. Braun, A. Lambrecht**
Single-Mode InP-Based Quantum Cascade Lasers for Applications in Trace-Gas Sensing
In: Gmachl, C. G. (ed.): Novel In-Plane Semiconductor Lasers III. Bellingham, WA: SPIE, 2004, 173 (SPIE-Proceedings 5365)
Photonics West, San José, CA (USA)
24 – 29 Jan 2004
- C. Mermelstein, J. Schmitz, R. Kiefer, M. Walther, J. Wagner**
Interband Type-II Miniband-to-Bound State Diode Lasers for the Mid-Infrared
Applied Physics Letters **85** (2004), 537
- C. Pfahler, C. Manz, G. Kaufel, M. T. Kelemen, M. Mikulla, J. Wagner**
High-Power, High-Brightness GaInSb/AlGaAsB Quantum-Well Diode Lasers Emitting at 1.9 μm
In: LEOS 2004 - Annual Meeting. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 479
17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS, Rio Mar (PR)
7 – 11 Nov 2004
- M. S. O'Droma, J. Portilla, E. Bertran, S. Donati, T. J. Brazil, M. Rupp, R. Quay
Linearisation Issues in Microwave Amplifiers
In: 12th European Gallium Arsenide & Other Compound Semiconductors Application Symposium
London: Horizon House, 2004, 199
- V. Palankovski, R. Quay
Analysis and Simulation of Heterostructure Devices
Wien, New York: Springer, 2004
- U. H. Jacobs, K. Scholle, E. Heumann, G. Huber, M. Rattunde, J. Wagner
Room-Temperature External Cavity GaSb-Based Diode Laser Around 2.13 μm
Applied Physics Letters **85** (2004), 5825

M. Rattunde, J. Schmitz, R. Kiefer, J. Wagner
Comprehensive Analysis of the Internal Losses in 2.0 μm (AlGaIn)(AsSb) Quantum-Well Diode Lasers
Applied Physics Letters **84** (2004), 4750

M. Rattunde, J. Schmitz, G. Kaufel, J. Wagner
GaSb-Based 2.3 μm Quantum-Well Diode-Lasers With Low Beam Divergence
In: LEOS 2004 - Annual Meeting. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 31
17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS, Rio Mar (PR) 7 – 11 Nov 2004

B. Aslan, H. C. Liu, A. Bezinger, P. J. Poole, M. Buchanan, **R. Rehm, H. Schneider**
High Responsivity, Dual-Band Response and Intradband Avalanche Multiplication in InGaAs/InP Quantum Well Photodetectors
Semiconductor Science and Technology **19** (2004), 442

M. Münzberg, W. Cabanski, W. Rode, J. Wendler, J. Ziegler, K. Eberhardt, **R. Rehm, J. Schmitz, F. Fuchs, J. Fleißner, M. Walther, H. Schneider**
3rd Gen Focal Plane Array IR Detection Modules and Applications
In: 8th Int. Conf. for Infrared Sensors & Systems IRS(2) 2004. Wunstorf: AMA, 2004, 137
8th Int. Conf. for Infrared Sensors and Systems, Nürnberg (D) 25 – 27 May 2004

D. Nübler, J. Wilcke, R. Brauns, U. Essen, **M. Schlechtweg, A. Tessmann**
A Linear Phased Array Demonstrator at 94 GHz
In: Int. Conf. on Radar Systems 2004

M. Schlechtweg, A. Leuther, A. Tessmann, C. Schwörer, H. Massler, W. Reinert, M. Lang, U. Nowotny, O. Kappeler, M. Walther, R. Lösch
Millimeter-Wave and Mixed-Signal Integrated Circuits Based on Advanced Metamorphic HEMT Technology
In: 2004 Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 609
16th Int. Conf. On Indium Phosphide and Related Materials IPRM 04, Kagoshima (J) 31 May – 4 Jun 2004

J. Würfl, **M. Schlechtweg**
Frontiers of III-V Compounds and Devices
In: 12th European Gallium Arsenide & Other Compound Semiconductors Application Symposium
London: Horizon House, 2004, 195

H. Schneider, T. Maier, J. Fleißner, M. Walther, P. Koidl, G. Weimann, W. Cabanski, M. Finck, P. Menger, W. Rode, J. Ziegler
High-Resolution 3 – 5 $\mu\text{m}/8 – 12 \text{mm}$ Dual-Band Quantum Well Infrared Photodetector Array
Electronics Letters **40** (2004), 831

H. Schneider, J. Fleißner, T. Maier, M. Walther, P. Koidl, G. Weimann, W. Cabanski, M. Finck, P. Menger, W. Rode, J. Ziegler
Mid-Wavelength, Long-Wavelength, and Dual-Band QWIP Focal Plane Arrays
In: 8th Int. Conf. for Infrared Sensors & Systems IRS(2) 2004. Wunstorf: AMA, 2004, 143
8th Int. Conf. for Infrared Sensors and Systems, Nürnberg (D) 25 – 27 May 2004

F. Sommer, T. Stephan, F. Vollrath, K. Köhler, M. Kunzer, S. Müller, P. Schlotter, W. Pletschen, U. Kaufmann, J. Wagner
III-N Based Short-Wavelength LEDs, LUCO-LEDs, and Lasers
In: Proceedings of ISBLLED 2004; physica status solidi (a) **201** (2004), 2628

T. Stephan, K. Köhler, M. Maier, M. Kunzer, P. Schlotter, J. Wagner
Influence of Mg Doping Profile on the Electroluminescence Properties of GaInN Multiple Quantum Well Light Emitting Diodes
In: Schubert, E. F. (ed.): Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing and Applications VIII. Bellingham, WA: SPIE, 2004, 118 (SPIE-Proceedings 5366)
Photonics West 2004, San José, CA (USA) 28 Jan 2004

A. Bessemoulin, J. Grunenputt, P. Fellow, **A. Tessmann, E. Kohn**
Coplanar W-Band Low Noise Amplifier MMIC Using 100 nm Gate-Length GaAs PHEMTs
In: 12th European Gallium Arsenide & Other Compound Semiconductors Application Symposium
London: Horizon House, 2004, 403

A. Tessmann, A. Leuther, H. Massler, M. Kuri, C. Schwörer, M. Schlechtweg, G. Weimann
A 220 GHz Metamorphic HEMT Amplifier MMIC
In: 2004 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 297
2004 IEEE Compound Semiconductor IC Symposium, Monterey, CA (USA) 24 – 27 Oct 2004

A. Tessmann, M. Riessle, S. Kudszus, H. Massler
A Flip-Chip Packaged Coplanar 94 GHz Amplifier Module With Efficient Suppression of Parasitic Substrate Effects
IEEE Microwave and Wireless Components Letters **14** (2004), 145

A. Tessmann, A. Leuther, C. Schwörer, H. Massler, W. Reinert, M. Walther, R. Lösch, M. Schlechtweg
Millimeter-Wave Circuits Based on Advanced Metamorphic HEMT Technology
In: Thumm, M. (ed.): 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics
Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 165

J. Lynch, E. Entchev, B. Lyons, **A. Tessmann, H. Massler, A. Leuther, M. Schlechtweg**
A Broadband 75 – 100 GHz MMIC Doubler
In: 34th European Microwave Conf.
London: Horizon House, 2004, 1017

J. Lynch, B. Lyons, E. Entchev, **A. Tessmann, H. Massler, A. Leuther, M. Schlechtweg**
W-Band Multiplier Chipset
Electronics Letters **40** (2004), 130

R. Kudrawiec, E. -M. Pavelescu, **J. Wagner, G. Sek, J. Misiewicz, M. Dumitrescu, J. Kontinen, A. Gheorghiu, M. Pessa**
Photoreflectance Evidence of Multiple Band Gaps in Dilute GaInNAs Layers Lattice-Matched to GaAs
Journal of Applied Physics **96** (2004), 2576

E. -M. Pavelescu, M. Dumitrescu, T. Jouhti, **J. Wagner, P. J. Klar, S. Karirinne, M. Pessa**
Elucidation of the Emission Red-Shift With Increasing Growth Temperature of MBE-Grown GaInNAs/GaAs Quantum Wells
IEE Proceedings Optoelectronics **151** (2004), 293

J. Wagner, D. Serries, K. Köhler, P. Ganser, M. Maier, L. Kirste, R. Kiefer
High In-Content InP-Substrate Based GaInAsN and GaInAsN QW Diode Lasers Emitting in the 2.2 to 2.3 μm Wavelength Range
In: 2004 Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, 32
16th Int. Conf. On Indium Phosphide and Related Materials IPRM 04, Kagoshima (J) 31 May – 4 Jun 2004

J. Wagner, C. Mann, M. Rattunde, G. Weimann
Infrared Semiconductor Lasers for Sensing and Diagnostics
Applied Physics A **78** (2004), 505

Conferences and Seminars

Vorträge und Seminare

P. Reichart, G. Datzmann, A. Hauptner, R. Hertenberger, C. Wild, G. Dollinger
Three-Dimensional Hydrogen Microscopy in Diamond
Science **306** (2004), 1537

E. Wörner, C. Wild
Innovative Anwendungen mit Dickschicht-CVD-Diamant
diamond business **4** (2004), 31

Q. K. Yang, C. Manz, W. Bronner, K. Köhler, J. Wagner
Room-Temperature Intersubband Emission from GaInAs-AlAsSb Quantum Cascade Structure
Electronics Letters **40** (2004), 1339

R. Aidam, R. Driad, R. Lösch, M. Walther
Molekularstrahlepitaxie von DHBTs auf InP
19. Workshop des DGKK-Arbeitskreises Epitaxie von III-V-Halbleitern, Freiburg/Br. (D)
9 – 10 Dec 2004

W. Cabanski, W. Rode, J. Wendler, J. Ziegler, J. Fleissner, F. Fuchs, R. Rehm, J. Schmitz, H. Schneider, M. Walther
State-of-the-Art 3rd Gen IR Detection Modules in Germany
6th Int. Military Sensing Symposium, Dresden (D)
18 – 21 Oct 2004

F. Fuchs, C. Mann, Q. K. Yang, W. Bronner, K. Köhler
InP-Based Single-Mode Quantum Cascade Lasers for Trace-Gas Sensing Applications
Int. Workshop on Quantum Cascade Lasers, Sevilla (E)
4 – 8 Jan 2004

F. Fuchs
InP-Based Quantum Cascade Lasers and Their Applications in Optical Sensing and Free-Space Communications
Laser Optik, Berlin (D)
3 Mar 2004

F. Fuchs, C. Mann, Q. K. Yang, W. Bronner, K. Köhler
InP-basierende Quantenkaskadenlaser für optische Sensorik und Freistrah-Kommunikation
34. Infrarot-Kolloquium, Freiburg/Br. (D)
20 – 21 Apr 2004

L. Kirste
Defektstruktur von epitaktischen (Al,Ga)N-Schichten
Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen (D)
13 Jan 2004

L. Lymperakis, M. Albrecht, J. Neugebauer, J. E. Northrup, L. Kirste, H. P. Strunk
Chemically Ordered Al_xGa_{1-x}N Alloys: Spontaneous Formation of Natural Quantum Wells
Frühjahrstagung Deutsche Physikalische Gesellschaft, Regensburg (D)
8 – 12 Mar 2004

E. Baumann, F. R. Giorgetta, D. Hofstetter, H. Wu, W. J. Schaff; L. F. Eastman, L. Kirste
Resonant Tunneling and Intersubband Absorption in AlN-GaN Superlattices
- 34. IR-Kolloquium, Freiburg/Br. (D)
20 – 21 Apr 2004
- E-MRS Fall Meeting 2004, Warsaw (PL)
6 – 10 Sep 2004

L. Kirste, N. Herres, K. M. Pavlov, S. T. Mudie, M. Albrecht, M. Bockowski
Comparison of the Defect Structure of As-Grown and High-Pressure Annealed (Al,Ga)N-Layers Showing Ordering
EMRS 2004 Spring Meeting, Strasbourg (F)
24 – 28 May 2004

L. Kirste, N. Herres, F. Windscheid, H. Güllich, M. Maier, P. Ganser, K. Köhler, J. Wagner
Optimization of the Growth of Pseudomorphic Quaternary Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}N_y Layers on GaAs and InP Substrates Using HRXRD Extended Bond Measurements
7th Biennial Conf. on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging (XTOP2004), Prague (CZ)
7 – 10 Sep 2004

S. Kallenbach, M. Kelemen, J. Weber, R. Aidam, R. Lösch, G. Kaufel, M. Mikulla
Entwicklung von InGaAsP/InP-Lasern hoher Brillanz bei 1,4 – 1,5 µm
Frühjahrstagung Deutsche Physikalische Gesellschaft, Regensburg (D)
8 – 12 Mar 2004

M. Kelemen, J. Weber, M. Mikulla
Ridge-Trapezlasers hoher Brillanz
Frühjahrstagung Deutsche Physikalische Gesellschaft, Regensburg (D)
8 – 12 Mar 2004

M. Kelemen
Der Trapezlaser – Ein Erfolgskonzept für hochbrillante Diodenlaser
Universität Würzburg (D)
1 Jul 2004

K. Köhler, T. Stefan, A. Perona, J. Wiegert, M. Maier, M. Kunzer, P. Schlotter, J. Wagner
The Mg Doping Profile of GaN/GaN Light Emitting Diodes in the Vicinity of the pn Junction
OSRAM, Regensburg (D)
3 Nov 2004

P. Koidl
Diamant aus der Gasphase
Universität Bonn (D)
11 May 2004

P. Koidl
Diamant-Bauteile für höchste Belastungen
Fraunhofer-Forum Südlicher Oberrhein, Lahr (D)
19 Jul 2004

T. Maier, H. Schneider, H. C. Liu, M. Walther, P. Koidl
Kohärente und inkohärente Ladungsträgerdynamik in Quantentopf-Infrarot-Photodetektoren
Frühjahrstagung Deutsche Physikalische Gesellschaft, Regensburg (D)
8 – 12 Mar 2004

T. Maier, H. Schneider, H. C. Liu, M. Walther, P. Koidl
Zwei-Photonen-Detektoren für Laserpuls-Diagnostik
34. IR-Kolloquium, Freiburg/Br. (D)
20 – 21 Apr 2004

T. Maier, H. Schneider, H. C. Liu, M. Walther, P. Koidl
Two-photon QWIPs for Quadratic Detection of Weak Mid-Infrared Pulsed Lasers
3rd Int. Workshop on Quantum Well Infrared Photodetectors QWIP 2004, Kananaskis (CDN)
8 – 13 Aug 2004

L. Hildebrandt, S. Stry, R. Knispel, J. R. Sacher, T. Beyer, M. Braun, A. Lambrecht, T. Gensty, W. Elsäßer, **C. Mann, F. Fuchs**
Quantum Cascade External Cavity and DFB Laser Systems in the Mid-Infrared Spectral Range: Devices and Applications
9th Meeting on Laser Applications to Chemical and Environmental Analysis (LACEA), Annapolis, MD (USA)
9 – 11 Feb 2004

L. Hildebrandt, S. Stry, R. Knispel, J. R. Sacher, **C. Mann, F. Fuchs**
Quantum Cascade External Cavity Laser Systems in the Mid-Infrared Spectral Range
24th Conf. on Lasers and Electrooptics (CLEO), San Francisco, CA (USA)
16 – 21 May 2004

C. Mann, Q. K. Yang, F. Fuchs, W. Bronner, K. Köhler, J. Wagner
Single-Mode InP-Based Quantum Cascade Lasers for Applications in CO- and NO-Detection
5th Workshop on Quantum Cascade Lasers, Freiburg/Br. (D)
23 – 24 Sep 2004

C. Mann, Q. K. Yang, F. Fuchs, W. Bronner, K. Köhler, J. Wagner
InP-Based Quantum Cascade Lasers for the Mid-Infrared Spectral Range
5th Workshop on Quantum Cascade Lasers, Freiburg/Br. (D)
23 – 24 Sep 2004

C. Mermelstein
Antimonide-Based Mid-Infrared Quantum Well Diode Lasers
National Research Council, Ottawa (CDN)
18 Aug 2004

S. Müller, K. Köhler
Growth of AlGaIn/GaN-Based Electronic Device Structures With Semi-Insulation GaN Buffer and AlN Interlayer
Int. Workshop on Nitride Semiconductors, Pittsburgh, PA (USA)
19 – 23 Jul 2004

R. Quay, D. Krause, R. Kiefer, A. Leuther, H. Massler, T. Merkle, S. Müller, M. Mikulla, M. Schlechtweg, A. Tessmann, G. Weimann
AlGaIn/GaN HEMT MMICs on SiC: Status and Challenges
European Microwave Week (EuMW), Amsterdam (NL)
11 – 15 Oct 2004

M. Rattunde
Physik und Anwendungen von III-Sb IR-Halbleiterdiodenlasern
Universität Freiburg, Freiburg/Br. (D)
6 Feb 2004

R. Rehm, J. Schmitz, F. Fuchs, J. Fleißner, M. Walther, W. Cabanski, D. Eich, M. Finck, W. Rode, J. Wendler, R. Wollrab, J. Ziegler
MWIR-Matrixdetektoren mit 256x256 Bildpunkten basierend auf antimonidischen Übergittern
34. IR-Kolloquium, Freiburg/Br. (D)
20 – 21 Apr 2004

M. Schlechtweg, A. Tessmann
Integrierte Höchstsfrequenzschaltungen für Sensorik-Anwendungen bis 220 GHz
FGAN, Wachtberg-Werthhoven (D)
12 May 2004

M. Schlechtweg
Integrierte Höchstsfrequenzschaltungen bis 200 GHz für Anwendungen in der Sensorik und Nachrichtentechnik
Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen (D)
17 Jun 2004

M. Schlechtweg
Terahertz Technology – Components for Millimeter-Wave and Sub-Millimeter-Wave Applications
Expert Meeting on Technologies for Force Protection in Germany, Bonn (D)
21 Sep 2004

M. Schlechtweg, A. Leuther, R. Lösch, H. Massler, W. Reinert, C. Schwörer, A. Tessmann, M. Walther
Millimeter-Wave Circuits Based on Advanced Metamorphic HEMT Technology
Joint 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Karlsruhe (D)
27 Sept – 1 Oct 2004

M. Schlechtweg
Terahertz Components for Urban Warfare Applications
Swedish/German Workshop Saab, Stockholm (S)
3 Nov 2004

J. Schmitz, C. Mermelstein, R. Kiefer, M. Walther, J. Wagner
MBE Growth of Mid-IR Type II Interband Laser Diodes
13th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Edinburgh (UK)
22 – 27 Aug 2004

J. Schmitz, C. Mermelstein, R. Kiefer, M. Walther, J. Wagner
MBE-Wachstum von Interband-Laser-Dioden für das mittlere Infrarot
19. Workshop des DGKK-Arbeitskreises Epitaxie von III-V-Halbleitern, Freiburg/Br. (D)
9 – 10 Dez 2004

H. Schneider, T. Maier, J. Fleissner, M. Walther, P. Koidl, W. Cabanski, M. Finck, P. Menger, W. Rode, J. Ziegler
Dual-Band QWIP Focal Plane Array für das zweite und dritte atmosphärische Fenster
34. IR-Kolloquium, Freiburg/Br. (D)
20 – 21 Apr 2004

H. Schneider, T. Maier, J. Fleissner, M. Walther, P. Koidl, G. Weimann, W. Cabanski, M. Finck, P. Menger, W. Rode, J. Ziegler
Dual-Band QWIP Focal Plane Array for the Second and Third Atmospheric Windows
3rd Int. Workshop on Quantum Well Infrared Photodetectors QWIP 2004, Kananaskis (CDN)
8 – 13 Aug 2004

H. Schneider
Quantum Well Infrared Photodetectors: Thermal Imaging, »Ultrafast« Detection
National Research Council, Ottawa (CDN)
25 Aug 2004

H. Schneider, J. Fleissner, T. Maier, M. Walther, P. Koidl, G. Weimann, W. Cabanski, M. Finck, P. Menger, W. Rode, J. Ziegler
High-Resolution QWIP Focal Plane Arrays: Towards Third-Generation Thermal Imagers
6th Int. Military Sensing Symposium, Dresden (D)
18 – 21 Oct 2004

H. Schneider
Quantumwell-Infrarot-Photodetektoren für Thermografie und »ultraschnelle« Detektion
Universität Regensburg (D)
15 Nov 2004

C. Schwörer
Rauscharme und regelbare Verstärker
Carl-Cranz-Gesellschaft, Oberpfaffenhofen (D)
28 Sep – 1 Oct 2004

J. Wagner
(AlGaIn)N-Based UV LED Chips for Tri-Phosphor White LEDs: Effect of Substrate Defect Density and Mg Doping Profile on UV Chip Performance
Japan-German-Spain Joint Workshop on Advanced Semiconductor Optoelectronic Devices and Materials, Yufuin (J)
13 – 14 Mar 2004

J. Wagner
III-N-Based Short-Wavelength LEDs, LUCO-LEDs, and Lasers
5th Int. Symposium on Blue Lasers and Light Emitting Diodes ISBLLED 2004, Gyeongju (ROK)
15 – 19 Mar 2004

J. Wagner
Bonding of Nitrogen in Dilute (AlGa)(NAs) and (GaIn)(NAs) on GaAs and InP
2nd Int. Workshop on Metastable Compound Semiconductors and Heterostructures, Marburg (D)
31 Mar – 01 Apr 2004

J. Wagner, M. Rattunde, E. Geerlings, C. Mermelstein, J. Schmitz, R. Kiefer, A. Hülsmann, M. Walther
Halbleiterdiodenlaser für das mittlere IR
34. IR-Kolloquium, Freiburg/Br. (D)
20 – 21 Apr 2004

J. Wagner, D. Serries, K. Köhler, P. Ganser, M. Maier, L. Kirste, R. Kiefer
High In-Content Dilute GaInAsN and GaInAsN QW Diode Lasers on InP Emitting at $\lambda > 2.2 \mu\text{m}$
6th Int. Conf. On Mid-Infrared Optoelectronic Devices and Materials MIOMD-VI, St. Petersburg (RUS)
28 Jun – 2 Jul 2004

M. Walther, J. Schmitz, R. Rehm, S. Kopta, F. Fuchs, J. Fleißner, W. Cabanski, D. Eich, M. Finck, W. Rode, J. Wendler, R. Wollrab, J. Ziegler
Growth of InAs/GaSb Short-Period Superlattices for High Resolution Mid-Wavelength Infrared Focal Plane Array Detectors
13th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Edinburgh (UK)
22 – 27 Aug 2004

M. Walther
QWIPs and InAs/GaSb Superlattices for Thermal Imaging
Northwestern University, Evanston, IL (USA)
4 Oct 2004

M. Walther, R. Rehm, F. Fuchs, J. Schmitz, J. Fleißner, W. Cabanski, D. Eich, M. Finck, W. Rode, J. Wendler, R. Wollrab, J. Ziegler
256x256 Mid-Wavelength Infrared Focal Plane Array Camera Based on InAs/GaSb Short-Period Superlattices
US Workshop on the Physics and Chemistry of II-VI Materials, Chicago, IL (USA)
5 – 7 Oct 2004

P. K. Baumann, J. Thomassen, M. Gersdorff, **C. Wild, E. Wörner, P. Koidl** (invited)
Ellipsoidal Microwave Plasma CVD Diamond System, Diamond Film Characterization and Applications
ICNDST-9, Tokyo (J)
26 – 29 Mar 2004

C. Wild, E. Wörner, W. Müller-Sebert, P. Koidl (invited)
Optical Applications of Large Area Diamond Wafers
Diamond 2004, Riva (I)
12 – 17 Sep 2004

E. Wörner, C. Wild, W. Müller-Sebert, M. Grimm, P. Koidl
High Temperature Infrared Absorption of CVD Diamond Measured by Laser Calorimetry
Diamond 2004, Riva (I)
12 – 17 Sep 2004

Q. K. Yang, C. Mann, F. Fuchs, K. Köhler, W. Bronner
Above Room-Temperature Single-Mode and Multi-Mode Operation of Strain-Compensated Quantum Cascade Lasers With Thin InAs Insertion Layers and AlAs Blocking Barriers
13th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Edinburgh (UK)
22 – 27 Aug 2004

Patents

Patente

H. Schneider, C. Schönbein
Halbleiterheterostruktur-Strahlungsdetektor, mit zwei spektralen Empfindlichkeitsbereichen
EP 0 856 201 B1
DE 596 10 134.1-08
CA 2 232 084

P. Koidl, E. Wörner, C. Wild
Schneidwerkzeug zur spanenden Bearbeitung von Werkstücken sowie Verfahren zum Herstellen eines Schneidwerkzeugs
DE 102 16 408 B4

P. Koidl, M. Seelmann-Eggebert, H. Güttler
Kompositstruktur für elektronische Mikrosysteme sowie Verfahren zur Herstellung der Kompositstruktur
EP 1 314 191 B1

M. Leich
Verfahren zum Demultiplexieren eines Datenstroms, insbes. eines optischen Datenstroms
DE 101 49 430 B4

H. Schneider, M. Walther
Halbleiterheterostruktur-Strahlungsdetektor für Wellenlängen aus dem infraroten Spektralbereich
EP 1 010 206 B1

Committee Activities

Arbeit in Fachgremien

Dr. Martina Baeumler

- Steering Committee of »Defect Recognition and Image Processing«; Member

Dr. Harald Schneider

- QWIP-2004 Workshop Kananaskis (CDN); Co-Chairman
- Program Committee »SPIE Conf. on Infrared Photoelectronics«, Warsaw (PL); Member

Prof. Peter Koidl

- Scientific Board Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung, Ettlingen (D); Member
- Advisory Committee Conference Series »European Conference on Diamond, Diamond-like, and Related Materials«; Member
- Program Committee »Int. Conference on Infrared Sensors & Systems 2004«, Nürnberg (D); Member

Dr. Carmen Mermelstein

- Program Committee SPIE Photonics West Conference »Novel In-Plane, Semiconductor Lasers«, San José, CA (USA); Member

Dr. Michael Schlechtweg

- Steering Committee »Gallium Arsenide Application Symposium GAAS«; Member
- Managing Committee of the IEEE Electron Devices Society - German Chapter; Member of Steering Committee
- Fachausschuss 3 der Ges. Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik im VDE/VDI; Member

Prof. Joachim Wagner

- Program Committee »Mid-Infrared Optoelectronic Materials and Devices« (MIOMD-VI); Member

Prof. Günter Weimann

- National Steering Committee BMBF-Verbund »Mobile Kommunikation«; Member
- Scientific Advisory Board Institut für Kristallzüchtung, Berlin (D); Chairman
- International Advisory Committee »Int. Symp. on Compound Semiconductors«; Member
- Technical Program Committee »34th European Solid-State Device Research Conference« ESSDERC 2004, Leuven (B); Member

Conference Organisation

Tagungsorganisation

Peter Koidl

34. IR-Kolloquium
Freiburg/Br. (D), 20 – 21 Apr 2004

Michael Schlechtweg

Gallium Arsenide Application Symposium
GAAS2004
Amsterdam (NL), 11 – 15 Sep 2004

Klaus Köhler, Stefan Müller, Andreas Bett, Frank Dimroth

19. Workshop DGKK-Arbeitskreis »Epitaxie von III-V-Halbleitern«
Freiburg/Br. (D), 09 – 10 Dec 2004

Exhibitions and Fairs

Ausstellungen und Messen

Das Forschungs- und Technologiekonzept der Bundeswehr

DWT Deutsche Gesellschaft für Wehrtechnik
25 – 26 May 2004, Bonn-Bad Godesberg (D)

ECOC 2004

The 30th European Conf. and Exhibiton on
Optical Communication
06 – 08 Sep 2004, Stockholm (S)

Zukunftsforum Mobiles Internet 2010

Bundesministerium für Bildung und Forschung
14 – 15 Sep 2004, Königswinter bei Bonn (D)

Scientific Awards

Wissenschaftliche Preise

Lutz Kirste

Carl-Theodor-Kromer-Preis 2004
Fakultät für Chemie, Pharmazie und
Geowissenschaften der Albert-Ludwigs-
Universität Freiburg
»Wachstum und Realstruktur von Epitaktischen
(Al,Ga)N-Schichten«

Daniel Krause

GAAS®2004 Best Paper Award
European GaAs and Other Compound
Semiconductors Application Symposium
»Robust GaN HEMT Low-Noise Amplifier
MMICs for X-Band Applications«

Günter Weimann

Heinrich-Hertz-Preis 2004
EnBW-Stiftung / Universität Karlsruhe (TH)
»Beiträge zur Anwendung und richtungswei-
senden Weiterentwicklung von III-V-
Halbleiterstrukturen für die Optoelektronik«

Doctoral Theses

Promotionen

12 young scientists are working at the
Fraunhofer IAF towards their doctoral theses
in electrical engineering and physics in coope-
ration with different universities, e. g. Aachen,
Freiburg, Karlsruhe.
One dissertation was completed in 2004:

*Insgesamt 12 junge Wissenschaftlerinnen und
Wissenschaftler arbeiteten 2004 am Fraunhofer
IAF an ihren Doktorarbeiten aus den Fachge-
bieten Elektrotechnik und Physik. Das IAF
kooperiert hier im Wesentlichen mit den
Universitäten Aachen, Freiburg und Karlsruhe.
Eine Promotion wurde 2004 abgeschlossen:*

Christian Mann

Entwurf und Charakterisierung von
Quantenkaskadenlasern
Universität Freiburg/Br.

Diploma Theses

Diplomarbeiten

Four students have been working on their
diploma theses in 2004 with cooperation of
different universities and "Fachhochschulen".
Three "Diplom-Arbeiten" were completed:

*In Zusammenarbeit mit verschiedenen Uni-
versitäten und Fachhochschulen arbeiteten
2004 vier Studenten am Fraunhofer IAF an der
Erstellung ihrer Diplomarbeiten.
Vier Arbeiten wurden 2004 abgeschlossen:*

Eva Geerlings

Konzepte zur Realisierung von Halbleiter-
diodenlasern mit externem Resonator für den
Wellenlängenbereich um 2 μm
Universität Freiburg/Br.

Daniel Krause

Entwurf und Charakterisierung von mono-
lithisch integrierten rauscharmen Verstärkern
auf der Basis von Galliumnitrid-Feldeffekt-
transistoren
Fachhochschule Offenburg

Wolfram Pernice

Diamantbauteile mit integrierter Sensorik für
tribologische Anwendungen
Universität Freiburg/Br.

Richard Reiner

Aufbau einer breitbandigen Terahertz-
Strahlungsquelle und Einsatz in der
Messtechnik
Fachhochschule Konstanz

Academic Lectures

Vorlesungen

Prof. Peter Koidl

Laserphysik und Optoelektronik
Universität Freiburg/Br., SS 04

Dr. Harald Schneider

Halbleiterbauelemente und -technologie
Universität Freiburg/Br., SS 04

Prof. Dr. Joachim Wagner

Theorie der Halbleiter
Universität Freiburg/Br., WS 03/04, WS 04/05

Prof. Dr. Günter Weimann

III-V-Halbleiterbauelemente
(Heterostrukturbauelemente)
Universität Karlsruhe (TH), SS 04

National Cooperations

Kooperationen Inland

German Industry

- Aixtron, Aachen
- AIM, Heilbronn
- Alcatel, Stuttgart
- Bosch, Stuttgart
- EADS, Ulm
- DaimlerChrysler, Ulm/Frankfurt
- DaimlerChrysler Aerospace, Ulm
- Diamond Materials GmbH, Freiburg/Br.
- Diehl BGT Defence, Überlingen
- EpiNova, Freiburg/Br.
- Freiburger Compound Materials, Freiburg/Sachsen
- GFD, Ulm
- Infineon Technologies, München/Berlin
- Jenoptik, Laser, Optik, Systeme GmbH, Jena
- Laser Components, Olching
- Leybold Systems, Hanau
- Lucent Technologies Network Systems, Nürnberg
- m2k-Laser, Freiburg/Br.
- OSRAM Opto Semiconductors, Regensburg
- Rhodia Acetow, Freiburg/Br.
- Rofin-Sinar, Hamburg
- RPG Radiometer Physics, Meckenheim
- Sacher Lasertechnik, Marburg
- SEL Verteidigungssysteme, Pforzheim/Weilimdorf
- Semic RF Electronic GmbH, Taufkirchen
- Sick, Waldkirch
- SiCrystal, Erlangen
- SHF-Design, Berlin
- Siemens, München/Erlangen/Regensburg
- Smiths-Heimann, Wiesbaden
- Sony International (Europe) GmbH, Stuttgart
- Spectra Physics, Darmstadt
- STOE, Darmstadt
- Telekom, Darmstadt
- Tesat-Spacecom, Backnang
- Thiel & Partner, Pulheim
- Trumpf-Laser, Schemmberg
- United Monolithic Semiconductors, Ulm
- Winter CVD-Technik, Hamburg
- Zeiss Optronik, Oberkochen

Research Institutions

- DESY, Zeuthen
- FhG-HHI, Berlin
- FhG-IIS, Erlangen
- FhG-ILT, Aachen
- FhG-IPM, Freiburg/Br.
- FhG-IST, Braunschweig
- FhG-IWM, Freiburg/Br.
- FhG-IZFP, Saarbrücken
- Forschungszentrum Jülich
- Forschungszentrum Karlsruhe
- Ferdinand-Braun-Institut, Berlin
- FGAN/FHR, Wachtberg-Werthhoven
- FGAN/FOM, Ettlingen
- Institut für Kristallzüchtung, Berlin
- Max-Born-Institut, Berlin
- MPI für Festkörperforschung, Stuttgart
- MPI für Mikrostrukturphysik, Halle
- Paul-Drude-Institut, Berlin
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Universities

- Bergakademie Freiberg/Sachsen
- Duisburg
- Erlangen
- FH München
- Frankfurt/M.
- Freiburg/Br.
- FU Berlin
- Hamburg
- Ilmenau
- Karlsruhe
- Kassel
- Paderborn
- Potsdam
- RWTH Aachen
- Stuttgart
- TU Berlin
- TU Darmstadt
- TU Dresden
- TU Hamburg-Harburg
- TU München
- Ulm
- Würzburg

International Cooperations

Kooperationen Ausland

Industry

- Alpes Lasers, Neuchâtel (CH)
- BAE-Systems, Pomona, CA (USA)
- CPI, Palo Alto, CA (USA)
- e2v Technologies, Lincoln (UK)
- Farran Technologies, Cork (IRL)
- Hitachi, Cambridge (GB)
- Hitachi Cable, Hitachi City (J)
- IBM, Yorktown Heights, NY (USA)
- IQE, Cardiff, UK
- Lucent Technologies, Bell Laboratories, Murray Hill/Holmdel, NJ (USA)
- Lumilog, Vallauris (F)
- M/A-COM, Lowell, MA (USA)
- Nippon Telegraph and Telephone Corp. NTT, Kanagawa (J)
- Nortel, Ottawa (CDN)
- OmniCorder Technol., Stony Brook, NY (USA)
- Philips Analytical, Eindhoven (NL)
- Picogiga, Paris (F)
- Thales, Paris (F)
- Bookham Technology, Zürich (CH)
- United Monolithic Semiconductors, Orsay (F)
- XENICS, Leuven (B)

Research Institutions

- Defence Evaluation and Research Agency (DERA), Malvern (GB)
- ESRF, Grenoble (F)
- IMEC, Leuven (B)
- Institut d'Electronique et de Microelectronique du Nord (IEMN), Lille (F)
- IRAM, Grenoble (F)
- Jefferson Lab, Newport News, VA (USA)
- LAAS, Toulouse (F)
- Lawrence Livermore National Lab (US)
- NTB, Buchs (CH)
- Paul-Scherrer-Institut, Villigen (CH)
- TNO, Den Haag/Delft (NL)
- US Naval Research Lab., Wash. DC (USA)
- Waseda University, Tokyo (J)
- Wright Laboratory, WLM/CPPO, Wright Patterson AFB (USA)

Universities

- Cornell University, Ithaca, NY (USA)
- ETH, Zürich (CH)
- Hebrew University of Jerusalem (IL)
- Middlesex University London (GB)
- Technion, Haifa (IL)
- University of Bari (I)
- University of Iowa, Iowa City, IA (USA)
- University of Michigan, Ann Arbor, IL (USA)
- University of Neuchâtel (CH)
- University of Sheffield (GB)
- University of Surrey, Guildford (GB)
- Université de Montpellier (F)
- University of Paris 7 (F)
- Université Pierre et Marie Curie, Paris (F)
- Universidad de Extremadura, Caceres (E)
- Universidad de Vigo (E)
- Università di Roma (I)
- Universität Wien (A)

How to find us

By car

from the south:

Autobahn A5 Basel – Karlsruhe, exit 62 »Freiburg Mitte«, towards Freiburg, 3rd exit »Offenburg / Industriegebiet Freiburg-Nord / Landwasser« (Paduaallee / Granadaallee / Lembergallee). Turn right at the 4th exit into Tullastrasse.

from the north:

Autobahn A5 Karlsruhe – Basel, exit 61 »Freiburg Nord« towards Freiburg until exit »Industriegebiet-Nord«. At 1st traffic light drive straight ahead direction Lörrach (Mooswaldallee / Lembergallee). At 5th traffic light turn left into Tullastrasse.

By train

Hourly IC- and EC-trains to Freiburg central station. From there 12 minutes by taxi.

By plane

Airport Basel-Mulhouse, one hour by bus or car to Freiburg.
Airport Frankfurt/M., 2.5 hours by train or car to Freiburg.

So finden Sie uns

Auto

von Süden:

Autobahn A5 Basel – Karlsruhe, Ausfahrt 62 »Freiburg Mitte«, Richtung Freiburg. Dritte Ausfahrt »Offenburg / Industriegebiet Freiburg-Nord / Landwasser« (Paduaallee / Granadaallee / Lembergallee). An der vierten Kreuzung rechts in die Tullastraße.

von Norden:

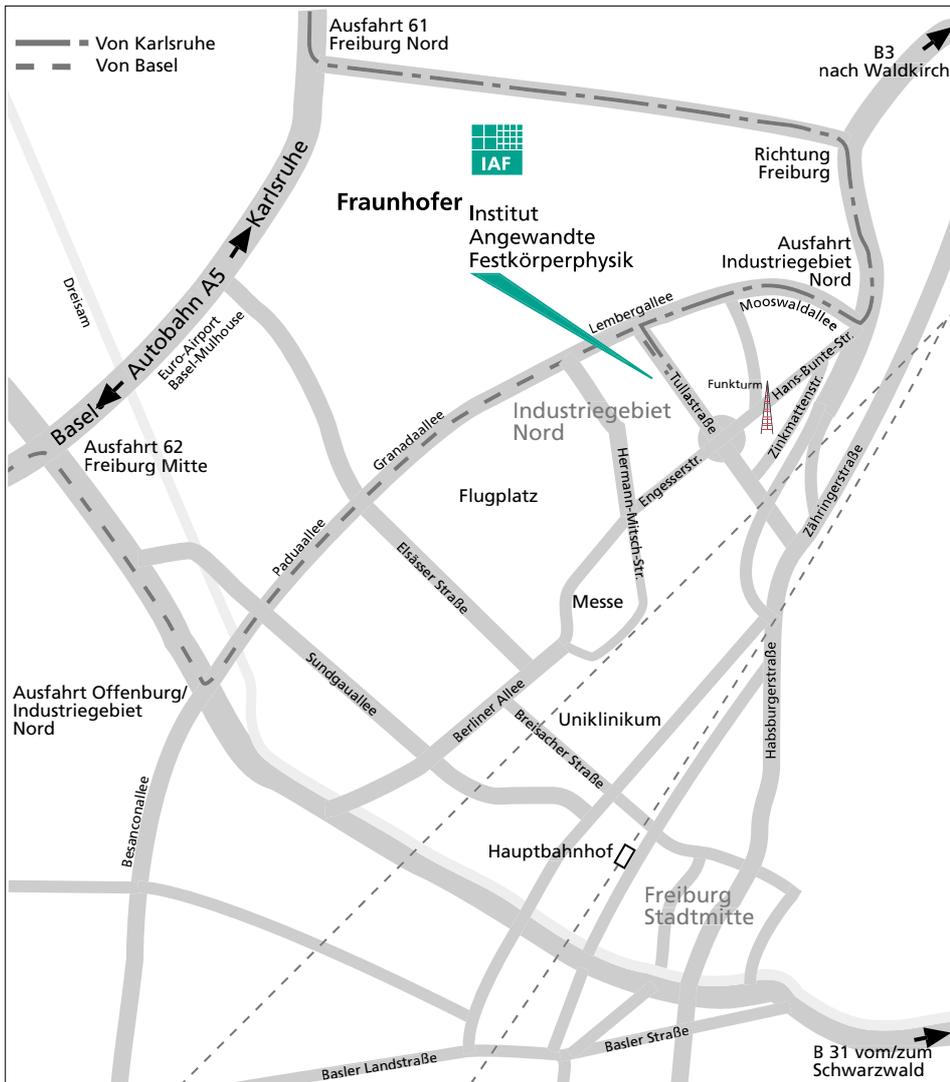
Autobahn A5 Karlsruhe – Basel, Ausfahrt 61 »Freiburg Nord«, Richtung Freiburg bis Abfahrt »Industriegebiet-Nord«. An der ersten Ampel geradeaus Richtung Lörrach (Mooswaldallee / Lembergallee), an der fünften Ampel links in die Tullastraße.

Zug

IC- und EC-Züge im Stundentakt nach Freiburg-Hauptbahnhof. Von dort ca. 12 Minuten mit dem Taxi zum IAF.

Flugzeug

Flughafen Basel-Mulhouse, eine Stunde mit Bus oder Auto nach Freiburg.
Flughafen Frankfurt/M., 2,5 Stunden mit Zug oder Auto nach Freiburg.



Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik
Tullastrasse 72
79108 Freiburg
Germany
Tel: +49 (0) 7 61 / 51 59-0
Fax: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 00
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de

Editorial Board:

Redaktion:

Helga König

Stefan Müller

Photos:

Fotos:

Liana Marek

Univ. Freiburg (p. 11)

GAAS®2004 (p. 11)

AIM, Heilbronn (p. 45)

Layout, Typesetting, Printing:

Layout, Satz, Druck:

netsyn, Joachim Würger, Freiburg

All rights reserved.

Reproduction requires the
permission of the Director
of the Institute.

Alle Rechte vorbehalten.

*Nachdruck nur mit Genehmigung
der Institutsleitung.*

© Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik
Freiburg 2005

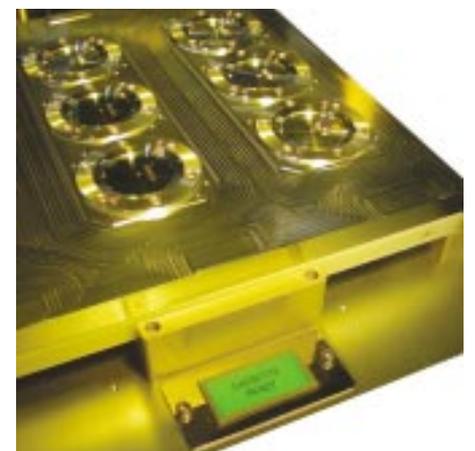
Transfer module of ICP etching system.
ICP etching is used for backside viahole processing of microstripline ICs.
Transferarm eines ICP-Ätzers. ICP-Ätzen wird eingesetzt für Rückseiten-Via-Prozess von Mikrostreifenleitungs-ICs.

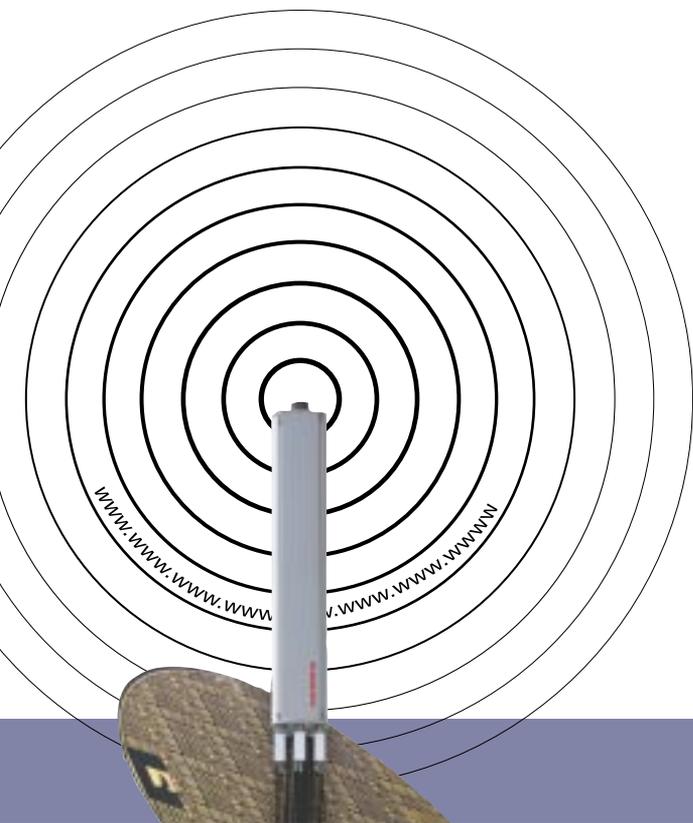


Cluster tool of a multi-wafer MBE system for growth of phosphorus containing compound semiconductors.
Transfer-Modul einer MBE-Anlage für das Wachstum von phosphorhaltigen Verbindungshalbleitern.



Cassette holding six 2" wafers for loading of e-beam writer.
Kassette für sechs 2"-Wafer zur Beschickung des Elektronenstrahlschreibers.





**Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF**
Tullastrasse 72
79108 Freiburg
Germany
Tel: +49 (0) 7 61 / 51 59-0
Fax: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 00
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de

Director
Prof. Dr. rer. nat. Günter Weimann

Information
Dr. rer. nat. Harald D. Müller
Tel: +49 (0) 7 61 / 51 59-4 58
Fax: +49 (0) 7 61 / 51 59-1 11
harald.mueller@iaf.fraunhofer.de