

2017

SCIENCE FOR CUSTOMERS

ANNUAL REPORT / JAHRESBERICHT

*Detailed view of a hetero-integrated
W-band transmit module.*

*Detailansicht eines mittels Heterointegration
realisierten W-Band-Sendemoduls.*

2017

**SCIENCE FOR
CUSTOMERS**

ANNUAL REPORT / JAHRESBERICHT



06	PREFACE Vorwort
08	RESEARCH FAB MICROELECTRONICS GERMANY Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland
14	OUR RESEARCH PORTFOLIO Unser Forschungsportfolio
16	ADVISORY BOARD Kuratorium 2017



Microelectronics

Mikroelektronik

20	THE WORLD'S FIRST InGaAs MOSFET-BASED MILLIMETER-WAVE CIRCUIT Die weltweit erste InGaAs-MOSFET-Millimeterwellenschaltung
24	GaN-BASED POWER AMPLIFIERS FOR THE EMERGING »INTERNET OF SPACE« GaN-Leistungsverstärker für neue Anwendungen im »Internet of Space«
28	GaN POWER DEVICES DIRECTLY BONDED ONTO DIAMOND HEAT SPREADERS Direktes Bonden von GaN-Leistungselektronik auf Diamant-Wärmespreizern
32	GaN ELECTRONICS FOR DEFENCE APPLICATIONS GaN-Elektronik für Verteidigungsanwendungen



Optoelectronics

Optoelektronik

- 38 PILOT PRODUCTION OF MINIATURIZED TUNABLE INFRARED LASERS**
Pilotfertigung miniaturisierter Wellenlängen-abstimmbarer Infrarot-Laser
- 42 2 μm SDL-PUMPED HO:YAG LASER**
2 μm SDL-gepumpter Ho:YAG-Laser
- 46 SELF-ADAPTIVE LED MODULES FOR CAMOUFLAGE IN THE VISIBLE**
Selbstadaptive LED-Module für Tarnung im Sichtbaren
- 50 SOLAR-BLIND AVALANCHE PHOTODIODES**
Sonnenlichtunempfindliche Avalanche-Photodioden
- 54 PLANAR InGaAs SWIR PHOTODIODES**
Planare InGaAs-SWIR-Photodioden



Systems and Demonstrators

Systeme und Demonstratoren

- 60 **PORTABLE W-BAND RADAR TO SUPPORT FIREFIGHTING OPERATIONS**
Tragbares W-Band-Radar zur Unterstützung bei Feuerwehreinsätzen
- 64 **APPLICATIONS FOR MINIATURIZED TUNABLE INFRARED LASERS**
Anwendungen miniaturisierter abstimmbarer IR-Laser



Materials and Technology Development

Material- und Technologieentwicklung

- 70 **DIAMOND-BASED SCHOTTKY DIODE**
Diamant-basierte Schottky-Diode
- 74 **GRAPHENE FLAKE PRODUCTION**
Herstellung von Graphenflocken
- 78 **HETERO-INTEGRATED W-BAND TRANSMIT MODULE**
Heterointegrierte W-Band-Sendemodule
- 82 **IMPROVEMENT IN THE EPITAXY OF HEMT STRUCTURES**
Verbesserungen bei der Epitaxie von HEMT-Strukturen



88	INSTITUTE IN FIGURES Institut in Zahlen
90	BUILDING SITES Aktuelle Bauvorhaben
92	ORGANIZATIONAL STRUCTURE Organisationsstruktur 2017
94	HIGHLIGHTS Höhepunkte
98	APPENDIX Anhang

Preface

Vorwort

2017 was the year in which Fraunhofer IAF celebrated its 60th birthday. Founded in 1957 as the »Institute for Electrical Materials IEW«, IAF has since the 1980s become a research and technology institute for III-V compound semiconductors. Today, we have the ability to design and fabricate devices and circuits based on these semiconductor materials, and provide prototypes to our customers for a variety of applications.

2017 was also the year in which our application-oriented strategy was successfully advanced. As a member of the Fraunhofer Group for Microelectronics we have succeeded, together with the two Leibniz Institutes working on microelectronics, in creating the »Research Fab Microelectronics Germany« (FMD). Under the BMBF-funded initiative, IAF will receive a total of € 16 million by the end of 2020 to expand its technological capabilities in epitaxy, processing and characterization of III-V devices and circuits. For us, this is a very important step in bringing our cleanroom equipment up to the latest state-of-the-art, as well as picking up on relevant technological developments at an early stage and integrating them into our technology portfolio. In addition, participation in the FMD also means a new quality of cooperation among the Fraunhofer and Leibniz institutes. In particular, we will focus on new technologies for heterointegration of III-V semiconductors with silicon-based electronics.

IAF is also changing »behind the scene«: The long-planned additional laboratories and a building for epitaxy equipment are being built at the rear of the main building since 2017, creating space for the new research infrastructure. In the main building, the refurbishment of the cleanroom is largely completed so that IAF is well positioned for cutting-edge research in III-V semiconductor technology over the next few years.

We would like to present the scientific development of the institute in 2017 in this annual report by giving examples of current R&D work in the fields of microelectronics and optoelectronics as well as the associated materials and technology development. We hope you enjoy reading our report.

Our sincere thanks go to the federal and state government for their continued funding, to our partners and customers for their trusting and constructive cooperation and, in particular, to all our colleagues at the institute for their continuous effort and dedication during the past year.

After one year of acting directorship in 2017, we are pleased that Fraunhofer IAF will again be headed by Prof. Oliver Ambacher, starting January 1st, 2018.



PROF. DR. JOACHIM WAGNER (left)
Executive Director (acting) in 2017

DR. MARTIN WALTHER (right)
Director (acting) in 2017

2017 war das Jahr, in dem das Fraunhofer IAF seinen 60. Geburtstag feiern konnte. Als »Institut für Elektrowerkstoffe IEW« 1957 gegründet, hat sich das IAF seit den 80er Jahren zu einem Forschungs- und Technologieinstitut für III/V-Verbindungshalbleiter gewandelt. Heute besitzen wir die Fähigkeit, Bauelemente und Schaltungen auf Basis dieser Halbleitermaterialien zu entwickeln und stellen diese in einer erweiterten Prototypenfertigung unseren Kunden für unterschiedliche Anwendungen zur Verfügung.

2017 war auch das Jahr, in dem die an den Anwendungen orientierte Strategie erfolgreich vorangebracht wurde. Als Mitglied des Verbunds Mikroelektronik ist es uns zusammen mit den zwei Mikroelektronik-Instituten der Leibniz-Gemeinschaft gelungen, die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« (FMD) ins Leben zu rufen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Vorhabens erhält das IAF bis Ende 2020 insgesamt 16 Millionen Euro zur Erweiterung seiner technologischen Fähigkeit in den Bereichen Epitaxie, Prozessierung und Charakterisierung von III/V-Bauelementen und Schaltungen. Dies ist für uns ein ganz wesentlicher Schritt, um unseren Anlagenpark im Reinraum auf den neuesten Stand der Technik zu bringen sowie relevante technologische Entwicklungen frühzeitig aufzugreifen und als neue Fähigkeiten in unser Technologieportfolio zu integrieren. Darüber hinaus bedeutet die Mitarbeit in der FMD für uns auch eine neue Qualität der Zusammenarbeit innerhalb der Fraunhofer- und Leibniz-Institute. Für das IAF stehen dabei insbesondere neue Verfahren zur Heterointegration von III/V-Halbleitern mit Silizium-basierten Technologien im Vordergrund.

Auch im »Hintergrund« wandelt sich das IAF: Hinter dem Hauptgebäude entstehen seit 2017 das geplante zusätzliche Laborgebäude sowie eine Halle für Epitaxieanlagen und schaffen Raum für die neue Forschungsinfrastruktur. Im Hauptgebäude konnte die Renovierung des Reinraumes weitgehend abgeschlossen werden, so dass das IAF für Spitzenforschung im Bereich der III/V-Halbleitertechnologie für die nächsten Jahre sehr gut aufgestellt ist.

Die wissenschaftliche Entwicklung des Instituts in 2017 möchten wir Ihnen anhand aktueller Arbeiten aus den Bereichen Mikroelektronik und Optoelektronik sowie der zugehörigen Material- und Technologieentwicklung im vorliegenden Jahresbericht vorstellen und wünschen eine interessante Lektüre.

Unser herzlicher Dank gilt unseren Förderern aus Bund und Land, unseren Partnern und Kunden und ganz besonders all den Kolleginnen und Kollegen am Institut für die vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit im zurückliegenden Jahr.

Nach einem Jahr der kommissarischen Institutsleitung 2017 freuen wir uns, dass die Leitung des IAF zum 01.01.2018 wieder in die Hände von Prof. Oliver Ambacher übergeht.

A high-magnification, angled view of a microchip die, showing a grid of square dies with intricate circuit patterns in gold, blue, and white. A dark blue rectangular overlay is positioned in the lower right quadrant of the die.

 **Forschungsfabrik
Mikroelektronik**
Deutschland

Research Fab
Microelectronics Germany
Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

The image shows a close-up, angled view of a microchip die. The die is composed of a grid of square cells, each containing intricate circuitry. The colors range from light blue and white to yellow and orange. A semi-transparent green wavy shape is overlaid on the bottom right portion of the die, partially obscuring it. A white dotted line follows the curve of the green overlay.

With the goal of addressing future challenges in microelectronics R&D, the eleven institutes of the Fraunhofer Group for Microelectronics as well as the Leibniz Institutes FBH and IHP have joined forces in the »Research Fab Microelectronics Germany«, which started in April 2017. Its aim is to fill existing capability gaps in an orchestrated way and to adapt relevant technology strands to the future needs of microelectronics technology. The 13 participating research facilities receive a total of about € 350 million from the Federal Ministry of Education and Research to acquire advanced equipment for microelectronic design, fabrication and testing. Fraunhofer IAF will receive € 16 million to expand its capabilities in III-V compound semiconductor technology during the years 2017 to 2020.

Mit dem Ziel, zukunftsrelevante Forschungsthemen möglichst effizient zu bearbeiten, haben elf Institute des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik sowie zwei Leibniz-Institute (FBH und IHP) die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« im April 2017 ins Leben gerufen. Das Konzept sieht vor, die technologischen Fähigkeiten der Mitgliedsinstitute in einem gemeinsamen Pool zusammenzuführen, über Investitionen neue technologische Fähigkeiten zu erlangen und wichtige Laborlinien für Mikroelektronik-Technologien an die technischen Herausforderungen anzupassen. Für die Neuschaffung von Geräten zum Entwickeln neuer Fähigkeiten erhalten die 13 beteiligten Forschungseinrichtungen insgesamt rund 350 Mio. € vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Auf das Fraunhofer IAF entfallen davon 16 Mio. € für den Ausbau seiner III/V-Halbleitertechnologie in den Jahren 2017 bis 2020.



Research is a core task of IAF. In a short interview, Arnulf Leuther (p. 10, top, l.) and Patrick Waltereit (p.10, top, r.), scientists in the department »Technology«, talk about the challenges and opportunities they see in the »Research Fab Microelectronics Germany« (FMD) for the institute as well as its partners and customers.



The »Research Fab Microelectronics Germany« (FMD) organizes itself in four technology parks:

- *Silicon-based Technologies*
- *Compound Semiconductors*
- *Hetero-integration*
- *Design, Test and Reliability*

Fraunhofer IAF is strongly involved in the »Compound Semiconductors« technology park, offering leading edge devices and circuits for frequencies up to 1 THz, high power GaN and AlGaIn transistors as well as optoelectronic devices.

How does the FMD plan to achieve its goals?

LEUTHER — Each member institute is an expert in its field. The FMD brings these experts together and provides the opportunity to pool knowledge and skills. The aim is to ensure the competitiveness of research institutions and to give access to innovative technologies to the national and the European electronics industry. The FMD starts with a common pool of equipment, which will be expanded continuously over the next few years. Parallel to the equipment park, digital infrastructure will be developed in order to make the cooperation between institutes and processes in the projects even more efficient and transparent.

WALTEREIT — Our focus is on cooperation: The FMD organizes itself in four technology parks, in which the central research areas of the various member institutes are united. The focus of Fraunhofer IAF is the technology park »Compound Semiconductors«, which is our central competence. By participating in the technology parks »Hetero-integration« as well as »Design, Test and Reliability«, IAF can significantly expand the projects thematically. Furthermore, with our III-V wafers and devices we can also realize projects together with participants in the technology park »Silicon-based Technologies« through hetero-integration.

Which topics do you deal with in this context?

LEUTHER — At Fraunhofer IAF we are working on electronics for the highest frequencies in the »Compound Semiconductors« technology park: GaN power transistors with frequencies of up to 200 GHz and low-noise amplifiers up to 1 THz based on metamorphic InGaAs-based transistors open up new possibilities in communications, surveillance and radar technology. Innovative manufacturing processes in epitaxy and processing are required for these devices: We need extremely clean semiconductor crystals with layers that are only a few nanometers thin, as well as very precise structuring methods to realize the transistors' electrodes, some of which are manufactured in an extreme topography. This is accompanied by modern analytical methods such as atomic-scale chemical characterization. The FMD, with the new equipment and partners, poses an ideal research environment.

Achieving more together

Gemeinsam mehr erreichen



Zukunftsrelevante Forschungsaufgaben zu lösen ist die Kernaufgabe des IAF. In einem Kurzinterview erzählen Arnulf Leuther (S. 10, oben l.) und Patrick Waltereit (S. 10, oben r.), Wissenschaftler in der Abteilung »Technologie«, von den Auswirkungen und Chancen, die sie bei der »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« (FMD) für das Institut und dessen Partner und Kunden sehen.

Wie möchte die FMD ihre Ziele erreichen?

LEUTHER — Jedes der Mitgliedsinstitute ist auf seinem Gebiet ein Experte. Die FMD bringt diese Experten zusammen und bietet die Chance, Kenntnisse und Fähigkeiten zu bündeln. Das Ziel ist es, die Wettbewerbsfähigkeit der Forschungseinrichtungen zu sichern und inländischen sowie europäischen Elektronikunternehmen Zugang zu innovativen Technologien zu verschaffen. Die FMD startet dabei mit einem gemeinsamen Gerätepark, der in den nächsten Jahren kontinuierlich ausgebaut wird. Parallel zum Gerätepark wird digitale Infrastruktur entwickelt, um so die institutsübergreifende Zusammenarbeit und Abläufe in den Projekten noch effizienter und transparenter zu gestalten.

WALTEREIT — Zusammenarbeit steht im Fokus: Die FMD organisiert sich in vier Technologieparks, in denen die Kernforschungsgebiete der verschiedenen Mitgliedsinstitute vereint werden. Das Fraunhofer IAF ist schwerpunktmäßig im Technologiepark »Verbindungshalbleiter«, der zentralen Kompetenz des Instituts, angesiedelt. Durch die Mitarbeit in den Technologieparks »Heterointegration« sowie »Design, Test und Zuverlässigkeit« kann das IAF die Projektarbeit thematisch signifikant erweitern. Weiterhin können wir mit unseren III/V-Wafern und -Bauelementen über die Heterointegration auch Projekte mit den Teilnehmern des vierten Technologieparks »Silizium-basierte Technologien« realisieren.

Welche Themen werden in diesem Zusammenhang bearbeitet?

LEUTHER — Am Fraunhofer IAF arbeiten wir beispielsweise im Rahmen des Technologieparks »Verbindungshalbleiter« an Elektronik für höchste Frequenzen: GaN-Leistungstransistoren mit Frequenzen bis 200 GHz und rauscharme Verstärker bis 1 THz auf der Basis von metamorphen InGaAs-basierten Transistoren werden neue Möglichkeiten in der Kommunikations-, Überwachungs- und Radartechnik eröffnen. Für diese richtungsweisenden Bauelemente werden innovative Herstellungsverfahren in der Epitaxie und der Prozessierung benötigt: Wir brauchen extrem saubere Halbleiterkristalle mit teilweise nur wenigen Nanometer dünnen Schichten sowie sehr präzise Strukturierungsverfahren für die Realisierung der Elektroden der Transistoren, die beispielsweise in einer extremen Topographie gefertigt werden. Die Herstellung wird begleitet durch moderne



»The cooperation within the FMD allows us to significantly expand our projects thematically.«



The FMD brings together silicon-based and III/V compound semiconductor-based »more than moore« technologies exploiting chip-, wafer- and board-level hetero-integration.



»The Research Fab Microelectronics Germany, with the new equipment and partners, constitutes an ideal research environment.«

WALTEREIT — In materials science, process engineering or in assembly and packaging technology, we are increasingly combining novel materials and devices. A central topic of FMD is therefore hetero-integration, in which various devices and components are merged. It is of great advantage if the experts in the different areas work closely together and can coordinate. During development we have to take into account the challenges of different technologies, structure sizes and materials. At the same time, however, our focus is also on the electrical and mechanical connection as well as the protection against external influences.

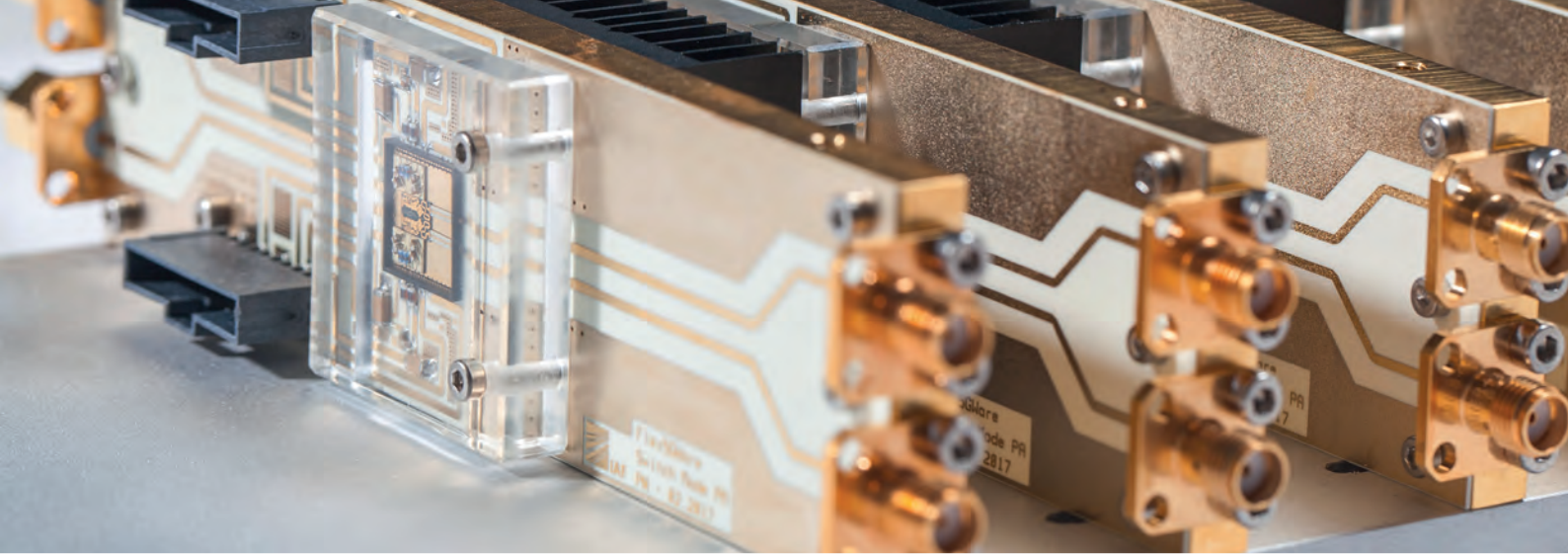
Which future projects can be expected at Fraunhofer IAF in connection with the FMD?

WALTEREIT — Currently, many projects are being launched with the support of the FMD. One of them is the project »VERTIGO«, in which GaN electronics are manufactured on 200 mm wafers. The special feature of this project is the vertical current flow through the volume of the device; conventional GaN power electronics operate with lateral current flow just below the surface. In this project, we work together with Fraunhofer ISIT and Fraunhofer IISB to develop wafers, devices and modules for smart systems, which are to be used, e. g. for an improved power supply in data centers or in electromobility.

LEUTHER — In 2018, the »Research Fab Microelectronics Germany« will also be present at trade fairs and events such as the Hannover Messe and Electronica, showing interested visitors what it is all about. In the long term, the FMD will also become digitally comprehensible for its members: In a virtual institute, cooperation and communication among all members should be even better implemented through appropriate digitalization. This illustrates that the smart systems that we are working on already benefit us and our customers today.



An interview with Dr. Arnulf Leuther, deputy head of the department »Technology«, and Dr. Patrick Waltereit, deputy head of the business unit »Power Electronics« and FMD project leader at IAF. Patrick Waltereit has been with IAF since 2004, doing research on GaN power electronics. Arnulf Leuther joined IAF in 1996. He is currently working on the hetero-integration of novel materials and devices.



Analyseverfahren wie etwa einer atomlagengenauen chemischen Charakterisierung. Innerhalb der FMD mit den neuen Geräten und den Partnern haben wir ein ideales Forschungsumfeld.

WALTEREIT — In der Materialwissenschaft, der Prozesstechnik oder auch der Aufbau- und Verbindungstechnik kombinieren wir zunehmend neuartige Materialien und Bauelemente miteinander. Ein zentrales Thema der FMD ist daher die Heterointegration, bei der verschiedene Bauteile und Komponenten zu einer neuen Einheit zusammengeführt werden sollen. Dabei ist es von großem Vorteil, wenn die Experten der unterschiedlichen Bereiche eng zusammenarbeiten und sich abstimmen können. Bei der Entwicklung müssen wir die Herausforderung der unterschiedlichen Technologien, Strukturgrößen und Materialien berücksichtigen. Gleichzeitig stehen für uns jedoch auch die elektrische und mechanische Verbindung sowie der Schutz gegen äußere Einflüsse im Fokus.

Welche Vorhaben sind zukünftig am Fraunhofer IAF im Zusammenhang mit der FMD zu erwarten?

WALTEREIT — Aktuell werden viele Projekte mit Unterstützung der FMD angestoßen. Eines davon ist das Projekt »VERTIGO«, bei dem GaN-Elektronik auf 200 mm Wafern entstehen soll. Das Besondere bei diesem Projekt ist der vertikale Stromfluss durch das Volumen des Bauelements; konventionelle GaN-Leistungselektronik arbeitet mit lateralem Stromfluss direkt unter der Oberfläche. Bei diesem Projekt arbeiten wir zusammen mit dem Fraunhofer ISIT und dem Fraunhofer IISB daran, Wafer, Bauelemente und Module für smarte Systeme zu entwickeln, die etwa für eine verbesserte Stromversorgung in Rechenzentren oder den Bereich der Elektromobilität eingesetzt werden sollen.

LEUTHER — Die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland wird im Jahr 2018 auch auf Messen und Veranstaltungen, wie beispielsweise auf der Hannover Messe und der Electronica, vertreten und so für interessierte Besucher »begreifbar« sein. Langfristig soll die FMD auch für ihre Mitglieder »begreifbar« werden, und zwar digital. In einem virtuellen Institut soll die Zusammenarbeit und Kommunikation aller Mitglieder untereinander durch entsprechende Digitalisierung noch besser umgesetzt werden. Die smarten Systeme, an deren Weiterentwicklung wir unter anderem arbeiten, kommen uns und unseren Kunden also bereits heute zugute.



The project »VERTIGO«

The increasing need for modern information technology and mobility calls for a more efficient way of dealing with our energy resources.

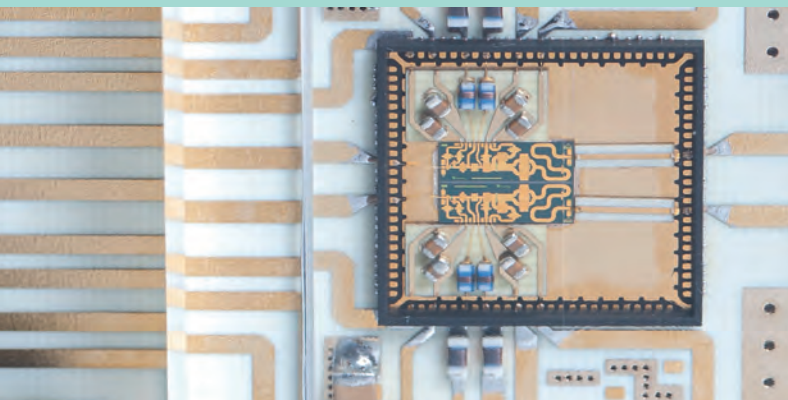
The Fraunhofer-funded project »VERTIGO« strives to develop completely new vertical components for power converters in the low voltage area, which are both well suited for a mass market as well as highly efficient. With this innovation, the losses in power conversion can be reduced by over 50%. This aim can be achieved by using new approaches in the fields of semiconductors, component technology and integrated packaging.

Our Research Portfolio

Unser Forschungsportfolio

We will develop electronic and optoelectronic devices and circuits based on III-V semiconductors for you. Our R&D services range from pure consultancy, measurement and design services to the epitaxy of III-V semiconductor heterostructures, the processing of wafers, diced electronic and optoelectronic devices, circuits as well as mounted and packed devices.

Microelectronics Mikroelektronik



Dr. Rüdiger Quay
Power Electronics
Phone +49 761 5159-843
ruediger.quay@iaf.fraunhofer.de

Dr. Michael Schlechtweg
High Frequency Electronics
Phone +49 761 5159-534
michael.schlechtweg@iaf.fraunhofer.de

Optoelectronics Optoelektronik



Dr. Ralf Ostendorf
Semiconductor Lasers
Phone +49 761 5159-638
ralf.ostendorf@iaf.fraunhofer.de

Dr. Robert Rehm
Photodetectors
Phone +49 761 5159-353
robert.rehm@iaf.fraunhofer.de

»Science for Customers«

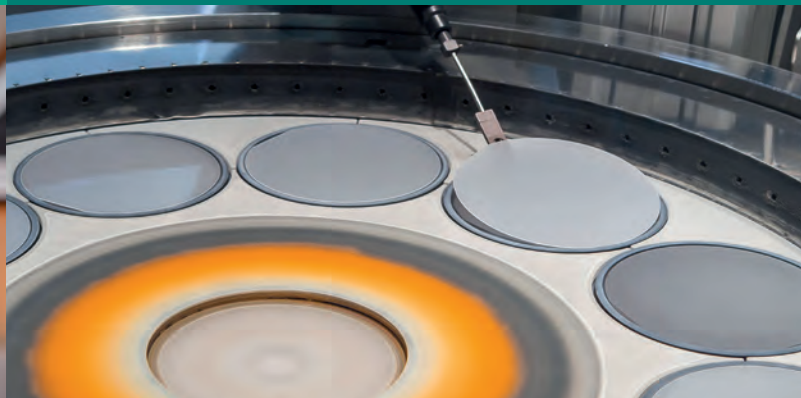
Wir entwickeln für Sie elektronische und optoelektronische Bauelemente und Schaltungen auf Basis von III/V-Halbleitern. Unsere angebotenen F&E-Leistungen reichen von reinen Beratungs- und Messleistungen sowie Schaltungsentwurf, über die Epitaxie von III/V-Halbleiter-Heterostrukturen, der Prozessierung von III/V-Wafern, elektronischen und optoelektronischen Bauelementen und Schaltungen bis hin zu aufgebauten und gehäusten Chips.

Systems and Demonstrators Systeme und Demonstratoren



Prof. Dr. Joachim Wagner
Division Director Business Units
Phone +49 761 5159-352
joachim.wagner@iaf.fraunhofer.de

Materials and Technology Development Material- und Technologieentwicklung



Dr. Martin Walther
Division Director Departments
Phone +49 761 5159-434
martin.walther@iaf.fraunhofer.de

Advisory Board Kuratorium 2017

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

DR. FRANZ AUERBACH

Infineon Technologies AG, Neubiberg

DR. JENS KOSCH

X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt

DR. HANS BRUGGER

(Chairman / Vorsitzender)
Airbus Defence & Space, Ulm

DR. RAINER KROTH

Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG, Überlingen

PROF. DR. JÉRÔME FAIST

ETH Zürich, Schweiz

DirWTD RAINER KRUG

Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik
und Nutzung der Bundeswehr, Koblenz

MRin DR. EHRENTAUD GRAW

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und
Wohnungsbau Baden-Württemberg, Stuttgart

PROF. DR. JÜRIG LEUTHOLD

ETH Zürich, Schweiz

DR. JOHANNES KOETH

nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH,
Gerbrunn



Participants of the Advisory Board meeting 2017 at Fraunhofer IAF, partly in representation of full members.

TeilnehmerInnen der Kuratoriumssitzung 2017 am Fraunhofer IAF, teilweise in Vertretung der Vollmitglieder.

Das Kuratorium, ein Expertengremium mit Vertretern aus Industrie, Forschung und Politik, begleitet die Forschungsarbeiten des Fraunhofer IAF und berät den Institutsleiter sowie den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft.

DR. THOMAS METZGER

Epcos AG, München

DR. DIETMAR SCHILL

Sony Deutschland GmbH, Stuttgart

DR. ANNE PARGE

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn

MinR NORBERT WEBER

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn

DR. THOMAS ROEDLE

Ampleon Netherlands B.V., Nijmegen, Niederlande

PROF. DR. WERNER WIESBECK

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

BDir WOLFGANG SCHEIDLER

(Guest / Gast)

European Defence Agency (EDA), Brüssel, Belgien

PROF. DR. JÖRG WRACHTRUP

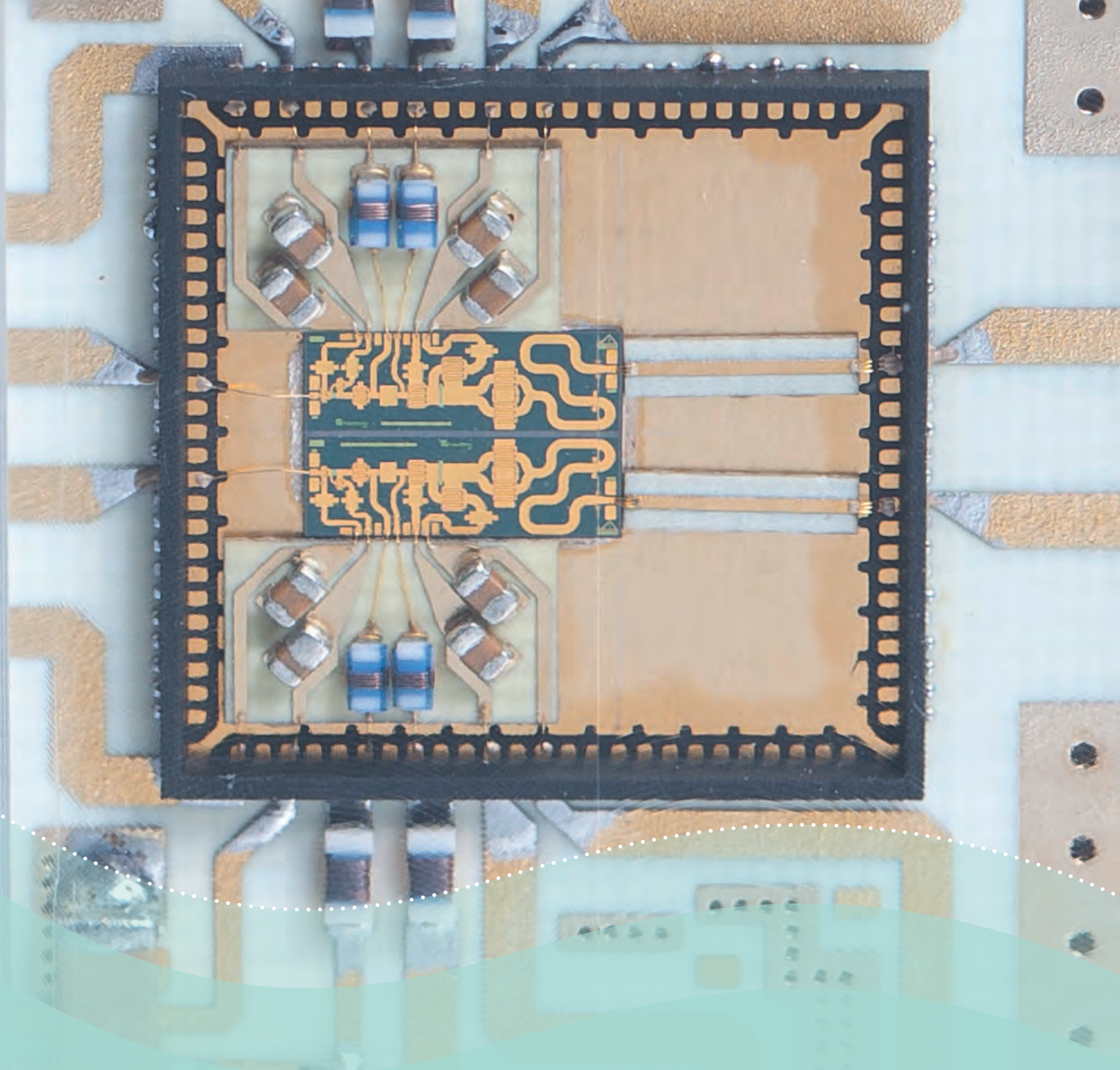
Universität Stuttgart

Microelectronics

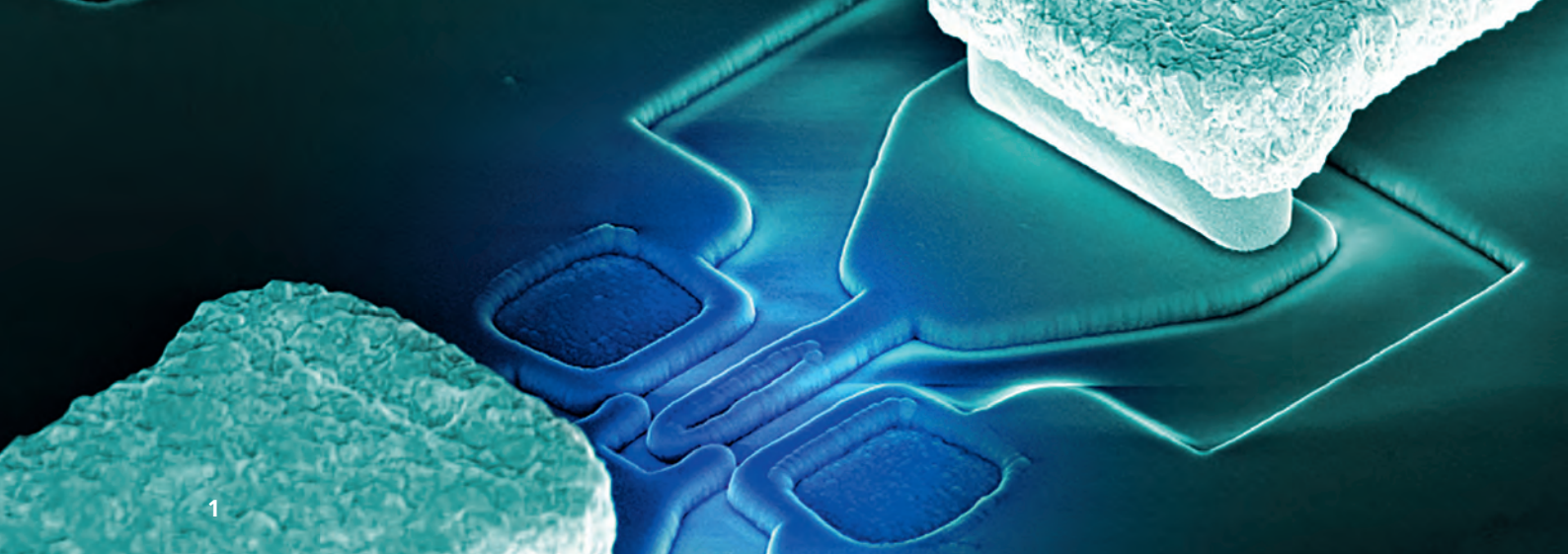
Mikroelektronik

III-V microelectronics is one of the core competences of Fraunhofer IAF. We develop transistors, monolithic integrated circuits (ICs) and modules for a broad range of applications. We realize ICs and modules for the microwave and (sub)millimeter-wave range up to 800 GHz for use in radar, free-space communication as well as earth observation satellites. In the field of power electronics we address power switches and converters with switching frequencies up to around 100 MHz as well as RF power amplifiers for mobile communication and radar.

Eine Kernkompetenz des Fraunhofer IAF ist die Mikroelektronik auf der Basis von III/V-Verbindungshalbleitern. Wir entwickeln Transistoren, monolithisch integrierte Schaltungen (ICs) und Module für ein breites Anwendungsspektrum. Adressiert werden Hochfrequenzanwendungen im Bereich der Mikrowellen und (Sub-)Millimeterwellen bis 800 GHz für Radar, Kommunikation und Satelliten sowie in der Leistungselektronik für den Einsatz in Energiewandlern mit Schaltfrequenzen bis 100 MHz und HF-Leistungsverstärker bis 100 GHz für Mobilfunk und Radar.



- 20 **The World's First InGaAs MOSFET-based Millimeter-wave Circuit**
Die Weltweit erste InGaAs-MOSFET-Millimeterwellenschaltung
- 24 **GaN-based Power Amplifiers for the Emerging »Internet of Space«**
GaN-Leistungsverstärker für neue Anwendungen im »Internet of Space«
- 28 **GaN Power Devices Directly Bonded onto Diamond Heat Spreaders**
Direktes Bonden von GaN-Leistungselektronik auf Diamant-Wärmespreizern
- 32 **GaN Electronics for Defence Applications**
GaN-Elektronik für Verteidigungsanwendungen



The World's First InGaAs MOSFET-based Millimeter-wave Circuit

Arnulf Leuther – arnulf.leuther@iaf.fraunhofer.de

Within the last 12 months, we were able to successfully develop an advanced $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ channel MOSFET technology with a gatelength of 30 nm and a 3 nm thick Al_2O_3 gate dielectric layer. For the first time, simultaneous f_T and f_{max} values beyond 300 GHz have been demonstrated using MOSFET technology. By employing a cascode transistor configuration, a four-stage H-band (220 – 325 GHz) amplifier MMIC was successfully realized. The circuit demonstrates a small signal gain of more than 10 dB in the frequency band between 227 and 278 GHz. This is the world's first III-V MOSFET amplifier MMIC operating in the frequency range of 220 to 330 GHz.

1 *Detailed view of an mHEMT.*
Detailansicht eines mHEMT.

Our motivation for the development of III-V MOSFETs was the possibility to combine the excellent high frequency performance of high electron mobility transistors (HEMTs) with the superior characteristics of oxide gate barriers, such as higher breakdown field, less temperature dependency, lower leakage current and smaller thickness. The oxide gate barrier is being used in silicon metal oxide semiconductor field effect transistors (MOSFETs). This development is driven by emerging difficulties in device scaling of III-V HEMTs and Si CMOS technologies. The scalability of HEMTs with ultra-short gatelengths below 20 nm reaches its limit due to the exponential increase of the gate leakage current caused by the reduced Schottky barrier thickness. To overcome this limitation, oxide barriers are a very promising approach. The advantage of the oxide barrier

compared to the HEMT Schottky gate is the drastically increased barrier height. Over the last years, the worldwide development of InGaAs MOSFETs was focused more on digital than on analog applications due to their potential to achieve a lower source resistance compared to Si MOSFETs. One of our main goals at Fraunhofer IAF is the development of next generation analog (sub-) millimeter-wave integrated circuits (MMICs) based on these very promising devices.

For more than 30 years, people have tried to employ III-V semiconductors in MOSFET technologies. The challenge in developing III-V MOSFETs is the control of the semiconductor/oxide interface. Defects at or close to the interface change their charge state during transistor operation, which reduces



- InGaAs MOSFET
- MMIC
- H-band amplifier
- Transistor scaling

Die weltweit erste InGaAs-MOSFET-Millimeterwellenschaltung

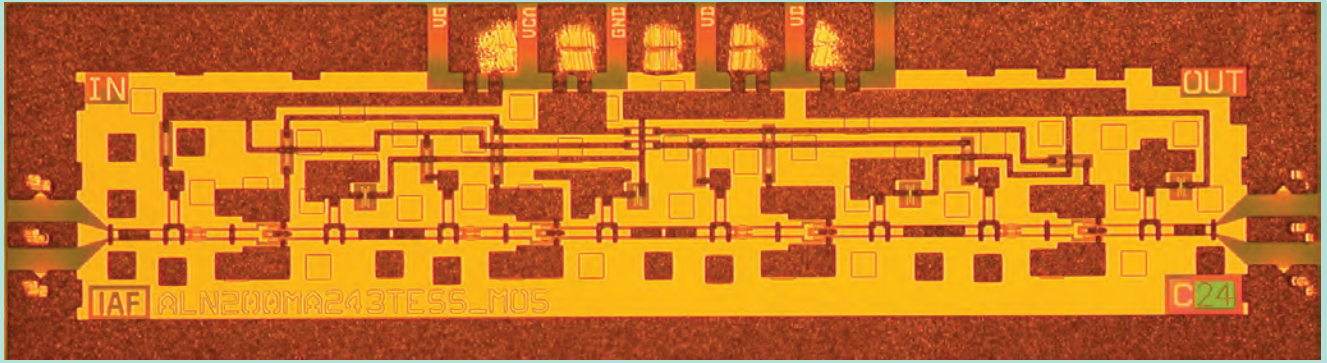
Innerhalb der letzten 12 Monate ist uns die Entwicklung einer neuen $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ -Kanal MOSFET-Technologie mit einer Gatelänge von 30 nm und einem 3 nm dicken Al_2O_3 Gate-Dielektrikum gelungen. Zum ersten Mal überhaupt konnte damit für einen MOSFET Grenzfrequenzen f_T und f_{max} von gleichzeitig mehr als 300 GHz demonstriert werden. Ein vierstufiger H-Band (220 – 325 GHz) Verstärker-MMIC unter Verwendung von Transistoren in Kaskoden-Konfiguration wurde erfolgreich hergestellt. Die Schaltung erzielt eine Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 dB im Frequenzbereich zwischen 227 and 278 GHz. Damit ist dies der weltweit erste III/V-MOSFET-Verstärker-MMIC für den Betrieb im Frequenzband von 220 bis 330 GHz.

306 GHz

*Frequency at which the current gain of the InGaAs MOSFET is equal to 1.
Frequenz, bei der die Stromverstärkung des InGaAs-MOSFETs gleich 1 ist.*

Unsere Motivation zur Entwicklung eines III/V-MOSFETs lag in der verlockenden Möglichkeit, die ausgezeichneten Hochfrequenzeigenschaften des High Electron Mobility Transistors (HEMTs) mit den überlegenen Eigenschaften einer Gate-Oxydbarriere zu verbinden. Als Vorteile der Oxydbarriere sind insbesondere die höhere elektrische Durchbruchfeldstärke, geringere Temperaturabhängigkeit, niedrigere Leckströme sowie die geringere minimale Dicke zu nennen. Die Verwendung von Oxyd als Gatebarriere hat dem üblicherweise Silizium-basierten Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) zum Namen und zum technologischen Durchbruch verholfen. Die Verbindung beider Technologien wird angetrieben durch die zunehmenden Schwierigkeiten in

der weiteren Skalierung der III/V-HEMT und Si-CMOS-Transistoren. Die Skalierbarkeit des HEMTs hin zu ultra-kurzen Gatelängen unterhalb von 20 nm wird durch den exponentiellen Anstieg des Gate-Leckstromes limitiert, der durch die notwendige Reduzierung der Schottky-Barrierendicke bedingt ist. Oxydbarrieren sind hier ein sehr vielversprechender Ansatz, diese Limitierungen zu überwinden. Die Vorteile der Oxydbarriere basieren weitgehend auf ihrer wesentlich höheren Potentialbarriere verglichen mit HEMT-Schottkykontakten. In den letzten Jahren waren die weltweiten Anstrengungen zur Entwicklung eines InGaAs-MOSFETs auf deren Einsatz in digitalen Schaltungsanwendungen fokussiert, mit dem Ziel, geringere Source-Widerstände als mit Si-MOSFETs zu erzielen.



2

2 *Micrograph of a four-stage H-band InGaAs MOSFET amplifier.*

Mikroskopaufnahme eines vierstufigen InGaAs-MOSFET-H-Band-Verstärkers.

the swing in the two-dimensional electron density in the semiconductor channel induced by the applied gate voltage. In recent years, different research groups have successfully demonstrated gate dielectrics with sufficiently low defect state densities by using atomic layer deposition (ALD) for the deposition of the isolating gate oxide on InGaAs surfaces.

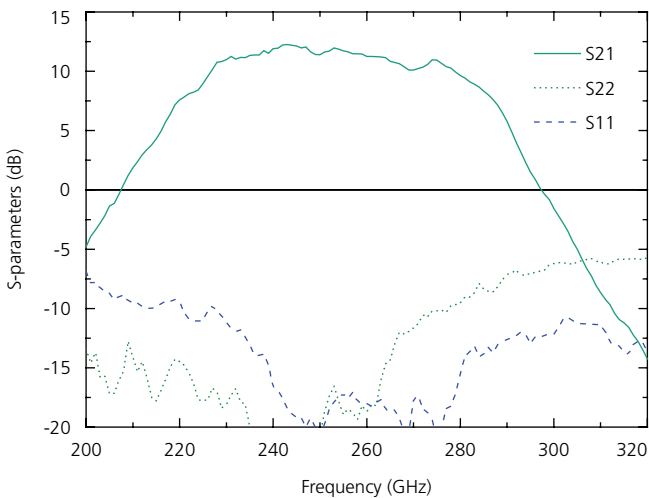
A potential drawback of III-V MOSFETs

compared to HEMTs in terms of RF performance is a reduction in electron mobility due to increased scattering at the oxide/semiconductor interface.

For the development of the presented InGaAs MOSFET MMIC technology, the fabrication flow was kept very similar to our well-

known process of the AlN-based HEMT technology. A 3 nm thick Al_2O_3 gate dielectric layer is deposited at 250°C using TMA and H_2O as Al and oxygen sources.

For the 30 nm gate length InGaAs MOSFET a transit frequency f_T of 306 GHz and a maximum oscillation frequency f_{max} of 381 GHz were extrapolated. This is the first time that a MOSFET technology demonstrates simultaneous f_T and f_{max} values above 300 GHz. A four-stage H-band amplifier was fabricated as a technology demonstrator (Fig. 2). The design has not been optimized yet for the newly developed InGaAs MOSFET devices, which leaves numerous possibilities for further improvement. The MMIC uses a cascode configuration, consisting of a series connection of one transistor in common source and one in common gate configuration. The width of the transistor gate is $2 \times 10 \mu\text{m}$ each. A chip micrograph of the realized 30 nm gate length H-band amplifier MMIC is presented in Fig. 2. The use of space-saving grounded coplanar waveguide technology resulted in an overall die size of only $0.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$. A small signal gain of more than 10 dB was measured in the frequency range from 227 to 278 GHz with a maximum gain of 12 dB at 250 GHz (Fig. 3). Due to the isolating gate oxide the gate leakage current density is about 3 orders of magnitude lower than for the same MMIC realized in 35 nm mHEMT technology. This has been the world's first demonstration of an MMIC in InGaAs MOSFET technology.



3 *Measured S-parameters of the four-stage InGaAs MOSFET-based H-band amplifier MMIC. A maximum small signal gain of 12 dB is achieved at 250 GHz.*

Gemessene S-Parameter des vierstufigen H-Band-Verstärker-MMICs. Eine maximale Kleinsignalverstärkung von 12 dB wird bei 250 GHz erreicht.

proven 35 nm gate length metamorphic HEMT technology. Identical processes are used for ohmic contacts, device isolation and passive elements like transmission lines, thin film resistors, capacitors and inductors. Furthermore, important gate module fabrication steps like recess etching or gate metallization were adopted. Special attention was paid to the preparation of the InGaAs surface. To avoid oxidation of the open InGaAs surface, the wafers are passivated by dipping them in a $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ solution. After rinsing in DI water and drying the wafers are transferred into the

Im Unterschied hierzu ist unser Hauptziel am Fraunhofer IAF die Entwicklung der nächsten Generation von analogen (Sub-) Millimeterwellen-Verstärkern (MMICs) basierend auf diesen sehr vielversprechenden Bauelementen.

Seit mehr als 30 Jahren haben Forscher versucht, Verbindungshalbleiter für die MOSFET-Technologie zu verwenden. Die Herausforderung des III/V-MOSFETs ist hierbei die Kontrolle der Halbleiter/Oxyd-Grenzfläche. Defekte direkt an oder in der unmittelbaren Nähe dieser Grenzfläche verändern ihren Ladungszustand im Betrieb des Transistors, wodurch die Durchstimbarkeit der zweidimensionalen Elektronengasdichte durch die angelegte Gate-Spannung reduziert wird. In den letzten Jahren ist es verschiedenen Forschergruppen jedoch erfolgreich gelungen, Gate-Dielektrika mit hinreichend niedrigen Defektdichten zu demonstrieren. Als Abscheideverfahren für die isolierenden Gateoxyde auf der InGaAs-Oberfläche wurde hierbei die Atomic Layer Deposition (ALD) eingesetzt. Ein potentieller Nachteil des III/V-MOSFETs im Vergleich zu HEMTs – mit Auswirkungen auf deren HF-Eigenschaften – liegt in der reduzierten Elektronenbeweglichkeit, hervorgerufen durch verstärkte Streuung der Elektronen an der Oxyd/Halbleiter-Grenzfläche. Dies gilt es, im Auge zu behalten.

In der Entwicklung der hier präsentierten InGaAs-MOSFET MMIC-Technologie wurde von Beginn an angestrebt, den

Produktionsablauf so nahe wie möglich an unserer gut etablierten 35 nm metamorphen HEMT-Technologie zu orientieren. Identische Prozessmodule werden für den ohmschen Kontakt, die Bauelementisolierung und die passiven Elemente, wie Zuleitungen, Dünnschichtwiderstände, Kapazitäten und Induktivitäten, verwendet. Darüber hinaus wurden wichtige Prozessschritte des Gate-Moduls, wie die Rezessätzung und die Gate-Metallisierung, übernommen. Besondere Sorgfalt galt der Präparation der InGaAs-Oberfläche. Im Anschluss an die Freilegung des InGaAs-Kanals wird die Oberfläche durch Lagerung in einer $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ -Lösung zunächst passiviert. Nach dem Spülen in DI-Wasser und Trocknen wird der Wafer umgehend in die ALD-Anlage transferiert, wo eine 3 nm dicke Al_2O_3 -Oxidschicht unter Verwendung von TMA und H_2O als Aluminium- und Sauerstoffquellen bei 250 °C auf diesem abgeschieden wird.

Basierend auf S-Parameter-Messungen wurden für den 30 nm InGaAs-MOSFET eine Transitfrequenz f_T von 306 GHz und eine maximale Oszillationsfrequenz f_{max} von 381 GHz extrapoliert. Dies ist das erste Mal, dass für eine beliebige MOSFET-Technologie gleichzeitig f_T - und f_{max} -Werte oberhalb von 300 GHz demonstriert werden konnten. Als Technologiedemonstrator wurde ein vierstufiger H-Band-Verstärker hergestellt (Abb. 2). Das Schaltungsdesign war hierbei noch nicht auf die neue Technologie optimiert, wodurch sich noch eine Vielzahl an Möglichkeiten für weitere Verbesserungen ergeben.

381
GHz

*Maximum oscillation
frequency.*

*Maximale Oszillations-
frequenz.*



1

GaN-based Power Amplifiers for the Emerging »Internet of Space«

Christian Friesicke – christian.friesicke@iaf.fraunhofer.de

The satellite communications (SatCom) industry is at a turning point: Current SatCom systems are not only evolving to higher frequencies but also need to become increasingly flexible to adapt to changing user demands in a cost-efficient way. In the future, large constellations with thousands of satellites are expected to be launched. These »Internet of Space« systems will require a radical change towards higher volumes and lower cost of satellite technology, and transmitters based on solid state power amplifiers (SSPAs) will become a key technology to achieve these goals.

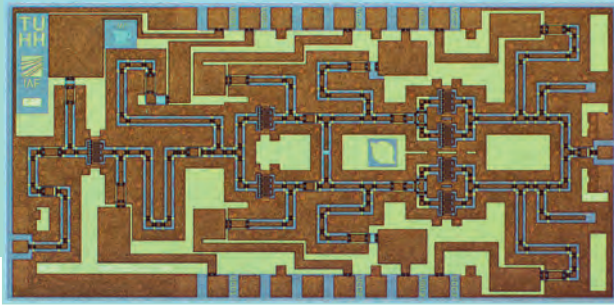
1 Solid state power amplifiers based on GaN HEMTs are increasingly used in satellite communication.
Halbleiter-Leistungsverstärker auf der Basis von GaN-HEMTs werden zunehmend in der Satellitenkommunikation eingesetzt.

How can we send e-mails when we are on an airplane or a ship? How can we reach even the remotest villages? How can we provide a highly reliable communication infrastructure for first responders after natural disasters? Satellite communication (SatCom) closes the gap when ground-based networks are not available. This is indispensable for today's information-driven society.

Similar to the trends in terrestrial networks, SatCom service providers face an ever-increasing demand for higher data rates and throughput. On the one hand, current generations of so called high-throughput satellites (HTS) with aggregated link capacities exceeding 100 Gbit/s are being launched to satisfy these needs. On the other hand, large constellations of thousands of satellites spanning the globe for ubiquitous access to an »Internet of Space« are envisaged for the future.

To achieve higher data rates, SatCom systems are moving to higher frequency bands. For example, so-called Ka-band systems typically transmit at downlink frequencies between 17.7 GHz and 21.2 GHz. The high throughput of these systems is realized by dozens of spot beams, each with a diameter of several hundred kilometers, which are projected onto the earth's surface and served individually – like the cells of ground-based mobile communication networks.

Further challenges for operators during the satellites' 15+ years of lifetime are changing demand and usage patterns, for example due to regional economic growth or temporary crises. To adapt to these developments, SatCom systems need to become more flexible. For instance, operators may want to individually adjust the transmit power, frequency or channel allocation of each spot beam. This need for emerging flexible, reconfigurable



- »Internet of Space«
- High-throughput satellites (HTS)
- Flexible payloads
- Solid state power amplifiers (SSPAs)
- Gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs)

GaN-Leistungsverstärker für neue Anwendungen im »Internet of Space«

Die Satellitenkommunikation (SatCom) befindet sich an einem Wendepunkt: Heutige Systeme entwickeln sich nicht nur zu höheren Frequenzbändern weiter, sondern müssen auch flexibler werden, um sich an wandelnde Bedürfnisse der Nutzer kostengünstig anpassen zu können. Zukünftig sollen tausende Satelliten als große Konstellationen zusammen ins All befördert werden. Diese »Internet of Space« Systeme erfordern einen radikalen Wechsel hin zu höheren Stückzahlen und niedrigeren Kosten der eingesetzten Komponenten. Halbleiter-basierte Sendeverstärker (sog. solid state power amplifiers, SSPAs) werden als Schlüsseltechnologie diese Ziele erreichbar machen.

2000 Gbit/s

*Estimated total capacity of high-throughput communication satellites in operation by 2018.
Geschätzte Gesamtkapazität von Kommunikationssatelliten mit hohem Datendurchsatz bis 2018.*

Wie können wir E-Mails von einem Flugzeug oder Schiff aus versenden? Wie können wir mit abgelegenen Dörfern kommunizieren? Wie können wir bei Naturkatastrophen eine zuverlässige Kommunikationsinfrastruktur für Hilfskräfte bereitstellen? Satellitenkommunikation (SatCom) schließt hier die Lücke zu den terrestrischen Netzwerken. Sie ist unverzichtbar für die informationsgetriebene Gesellschaft von heute.

Ähnlich zu den terrestrischen Netzwerken steht auch die SatCom-Industrie vor einer steigenden Nachfrage nach höherer Bandbreite und Datendurchsatz. Auf der einen Seite wird diese Nachfrage durch die aktuelle Generation von Hochdatenraten-Satelliten (HTS) bedient, die jeweils eine Gesamtkapazität von mehr als 100 Gbit/s haben. Auf der anderen Seite sind für die Zukunft große Konstellationen von tausenden den Globus

umspannenden Satelliten geplant, die den allgegenwärtigen Zugang zu einem »Internet of Space« ermöglichen sollen.

Um höhere Datenraten zu erreichen, werden in der Satellitenkommunikation höhere Frequenzbänder genutzt. Sogenannte Ka-Band-Satelliten senden beispielsweise bei Frequenzen zwischen 17,7 GHz und 21,2 GHz Signale zur Erde. Eine große Herausforderung besteht darin, dass sich das Nutzerverhalten und die damit verbundene Nachfrage während der mehr als 15-jährigen Lebensdauer von Satelliten ändern kann, z. B. durch ökonomisches Wachstum, aber auch durch Krisen in bestimmten Regionen. Um sich besser anpassen zu können, müssen SatCom-Systeme flexibler werden. Das erfordert zum Beispiel, dass der Betreiber die Sendeleistung oder die Frequenz-/Kanal-Zuweisung während des Betriebs ändern kann. Für solche



2

2 Spot beam coverage over Europe and the Mediterranean basin by Eutelsat's »KA-SAT« satellite.

Photo: Courtesy of Eutelsat Communications S.A.

Spot-Beam-Abdeckung von Eutelsats Satelliten »KA-SAT« über Europa und dem Mittelmeer. Foto: Bereitgestellt durch Eutelsat Communications S.A.

transmitters opens up new possibilities for SSPAs to become a key technology.

In the past, transmitters on satellites were commonly realized using traveling-wave tube amplifiers (TWTAs), due to their unrivaled output power and efficiency. However, manufacturers are starting to replace TWTAs with SSPAs based on gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs). This is done especially for transmitters with lower output power, which can be built in a more compact and lightweight way. Furthermore, they can be switched on and off quickly, which makes them well-suited for emerging flexible or reconfigurable payloads.

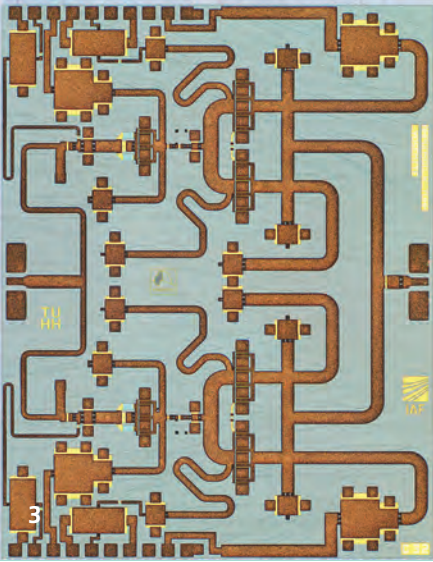
Using its 250 nm gatelength GaN HEMT technology, Fraunhofer IAF has designed and fabricated monolithic microwave integrated circuits (MMICs) for these applications. Together with our partners from the Hamburg University of Technology (TUHH) we have demonstrated a 10 watt single-chip amplifier that exhibits a peak power-added efficiency (PAE) of 30 % and a linear gain of 20 dB at the Ka-band SatCom downlink band at 18 GHz. As a first development step towards that goal, the integration of Fraunhofer IAF's Ka-band amplifier chips into a low-temperature co-fired ceramic (LTCC) module has been carried out by our partner Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG in Backnang.

Since most of the spectrum is already used in the well-established Ka-band, SatCom

operators are evaluating even higher frequency bands to shift some of the workload. Here, the Q/V-band downlink between 37.5 and 42.5 GHz and the E-band downlink at 71–76 GHz are on the roadmap. Fraunhofer IAF also addresses these frequency bands with its down-scaled 100 nm GaN HEMT technology.

Together with our partners from TUHH we developed and tested an MMIC with 2 watt output power at the Q/V-band downlink (40 GHz). These amplifiers are currently intended as highly linear driver amplifiers for TWTAs. Here, they can replace existing SSPA technology based on gallium arsenide (GaAs), which is limited in linear output power. In addition to that, the anticipated »Internet of Space« systems with large constellations of thousands of satellites will likely operate at the Q/V-band, too. They will employ more spot beams with smaller diameters (dozens of kilometers) than current systems, which will further push the demand for SSPAs at these frequencies.

In the future, E-band SatCom may become a viable alternative to access further available spectrum. Fraunhofer IAF has demonstrated an MMIC with 1 watt output power at 71 GHz, and a fully integrated SSPA module with 1.3 watt output power at 74 GHz. With these recent developments, European GaN technology from Fraunhofer IAF paves the way towards new »Internet of Space« applications.



3 *Chip photo of a GaN HEMT power amplifier MMIC with 10 watt output power at 18 GHz.*

Chip-Foto eines GaN-HEMT-Leistungsverstärker-MMICs mit 10 Watt Ausgangsleistung bei 18 GHz.

flexible Kommunikationssatelliten könnten Halbleiter-Leistungsverstärker (SSPAs) zu einer Schlüsseltechnologie werden.

In der Vergangenheit wurden Sendeverstärker auf Satelliten üblicherweise mit Hilfe von Wanderfeldröhren-Verstärkern (TWTAs) realisiert, da diese bezogen auf Ausgangsleistung und Wirkungsgrad konkurrenzlos sind. SSPAs auf Basis von Galliumnitrid-HEMTs sind bei niedrigeren Ausgangsleistungen jedoch kompakter und leichter. Sie können außerdem schnell an- und ausgeschaltet werden, was ein unschlagbarer Vorteil für flexible bzw. rekonfigurierbare Nutzlasten ist.

Da das Spektrum im schon etablierten Ka-Band bereits relativ stark ausgelastet ist, soll die Last auf weitere, höher gelegene Frequenzbänder verteilt werden. Hier ist das Q/V-Band zwischen 37,5 GHz und 42,5 GHz gesetzt; das E-Band (71 bis 76 GHz) könnte danach folgen. Das Fraunhofer IAF kann auch diese Frequenzbänder mit Hilfe seiner 100 nm GaN-HEMT-Technologie bedienen.

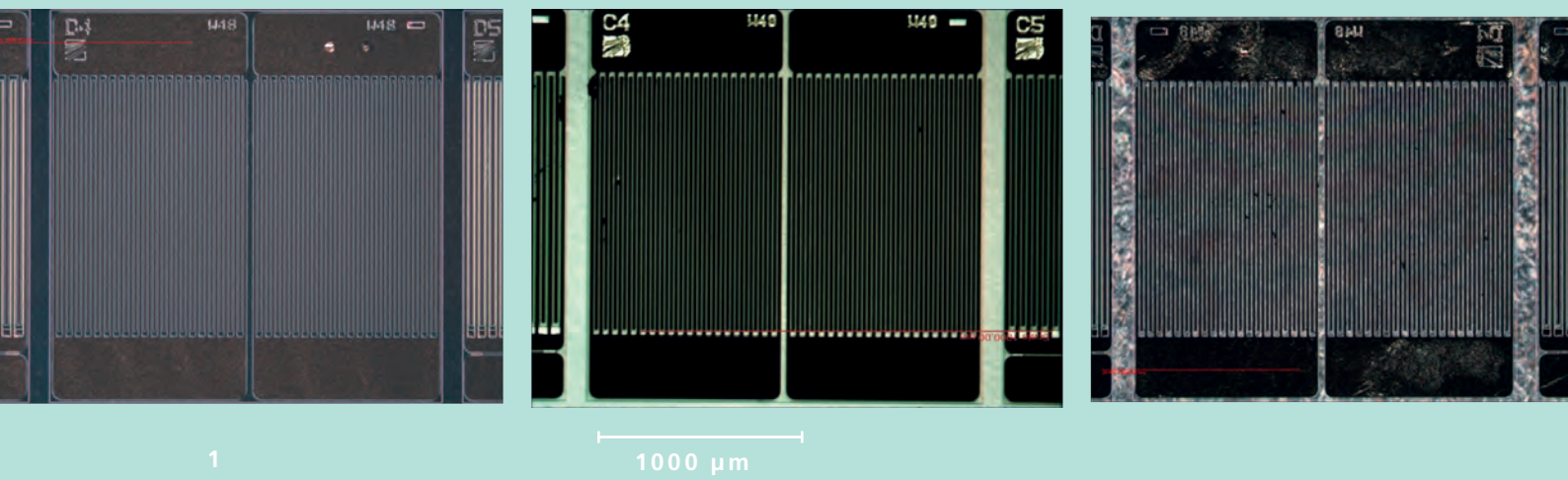
In Kooperation mit unserem Partner von der TUHH wurde ein Leistungsverstärker-MMIC mit 2 Watt Ausgangsleistung im Q/V-Band bei 40 GHz entworfen, hergestellt und gemessen. Diese Verstärker sind als hochlineare Treiberverstärker für TWTAs gedacht. Dort können sie herkömmliche Treiberverstärker auf Basis von Galliumarsenid (GaAs) ersetzen, da diese in ihrer Ausgangsleistung beschränkt sind. Zusätzlich könnten sie in den geplanten »Internet of Space«-Systemen zum Einsatz kommen, da diese möglicherweise das Q/V-Band nutzen werden.

In der Zukunft könnte Satellitenkommunikation im E-Band eine gangbare Alternative sein, um ein neues Spektrum zu erschließen. In diesem Frequenzband konnte das Fraunhofer IAF einen Leistungsverstärker-MMIC mit 1 Watt Ausgangsleistung bei 71 GHz zeigen. Weiterhin wurden an komplett integrierten SSPA-Modulen eine Ausgangsleistung von 1,3 Watt bei 74 GHz gemessen. Mit diesen neuen Entwicklungen ebnet europäische GaN-HEMT-Technologie des Fraunhofer IAF den Weg in Richtung des »Internet of Space«.

7518

Number of V-band satellites in the large constellation planned by SpaceX. Anzahl der V-Band-Satelliten in der großen, von SpaceX geplanten Konstellation.

Das Fraunhofer IAF hat unter Verwendung seiner GaN-HEMT-Technologie mit 250 nm Gatelänge monolithisch integrierte Mikrowellenschaltungen (MMICs) für diese Anwendungen entworfen und hergestellt. Zusammen mit unseren Partnern an der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) wurde ein Ein-Chip-Leistungsverstärker demonstriert, der bei der Ka-Band-Sendefrequenz von 18 GHz eine Ausgangsleistung von 10 Watt, einen Spitzenwirkungsgrad von 30 % und eine Kleinsignal-Verstärkung von 20 dB aufweist. Als ersten Schritt in diese Richtung wurde die Integration der hergestellten Chips in ein Modul aus Niedertemperatur-Keramik (LTCC) vorgenommen. Der Aufbau des Moduls wurde von unserem Partner Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG in Backnang durchgeführt.



GaN Power Devices Directly Bonded onto Diamond Heat Spreaders

Thomas Gerrer – thomas.gerrer@iaf.fraunhofer.de

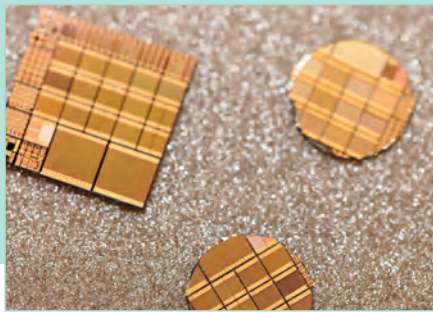
GaN power devices require, like any other power electronics, appropriate heat removal to deliver their full potential. Using diamond with its outstanding high thermal conductivity as a heat spreader is an attractive approach towards optimized thermal management. Therefore, we have developed a novel bonding process for GaN-based electronic devices on diamond heat spreaders. Such devices with complex topology are transferred from silicon onto diamond substrates by van der Waals bonding. Load-pull measurements on RF transistors demonstrate that the transfer is performed without any degradation of the devices. A thermal analysis of the hybrids on large-area AlGaN/GaN Schottky diodes loaded with high electric power revealed improved heat dissipation on the diamond substrates.

- 1 *Two 2x1 mm² GaN Schottky diodes on silicon, PCD and SCD (from left to right). 2x1 mm² GaN-Schottky-Dioden auf Si, PCD und SCD (von links nach rechts).*

Fraunhofer IAF develops GaN-based power amplifiers for high frequencies and output power using large-diameter, low-cost silicon substrates. In power electronics, however, heat is a major limitation for device output power and reliability. In order to significantly improve the heat dissipation on GaN-based RF power transistors, the silicon substrate (thermal conductivity 149 W/m•K) required for the growth of GaN-based transistors was replaced by diamond (2200 W/m•K). Such GaN/diamond hybrids can be fabricated by growth or by bonding. The growth of AlGaN/GaN on diamond usually suffers from a poor electronic quality of the GaN layers. In the reverse approach, when growing polycrystalline diamond onto AlGaN/GaN heterostructures, a thermally poor transition layer between diamond and GaN hinders the heat

flow into the diamond substrate. In addition, the GaN devices have to withstand the harsh diamond growth conditions including high temperature and hydrogen plasma. In contrast, the fabrication by bonding is a flexible approach to fabricate GaN/diamond hybrids and disturbed transition layers can be avoided when using single crystalline diamond.

At Fraunhofer IAF, the bonding of GaN and diamond is achieved by a van der Waals bonding technology, where capillary forces establish a close contact between the GaN and diamond surfaces and subsequent annealing creates a stable bond. The technology was developed for bonding of AlGaN/GaN heterostructures to both polycrystalline (PCD) and single crystalline (SCD) diamond. PCD was grown by microwave chemical vapor



- Heat spreader
- GaN power electronics
- Wafer bonding
- Thermal analysis

Direktes Bonden von GaN-Leistungselektronik auf Diamant-Wärmespreizern

GaN-Leistungsbaulemente benötigen wie jede andere Leistungselektronik eine effiziente Wärmeabfuhr, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Der Einsatz von Diamant mit seiner hervorragenden hohen Wärmeleitfähigkeit als Wärmespreizer ist ein attraktiver Ansatz für eine optimierte Entwärmung. Daher haben wir einen neuartigen Bondprozess für GaN-basierte elektronische Geräte auf Diamant-Wärmespreizern entwickelt. Die GaN-Baulemente mit komplexer Topologie werden von Silizium auf Diamantsubstrate übertragen, wobei Van-der-Waals-Kräfte die Bindung an das Substrat ermöglichen. Die transferierten HF-Transistoren zeigten in Load-Pull-Messungen keine Beeinträchtigung in ihrer Leistungsfähigkeit. AlGaN/GaN-Schottky-Dioden auf Diamant zeigten bei hoher elektrischer Leistung eine deutlich verbesserte Wärmespreizung.

2200
W/m•K

*Thermal conductivity
of diamond.*

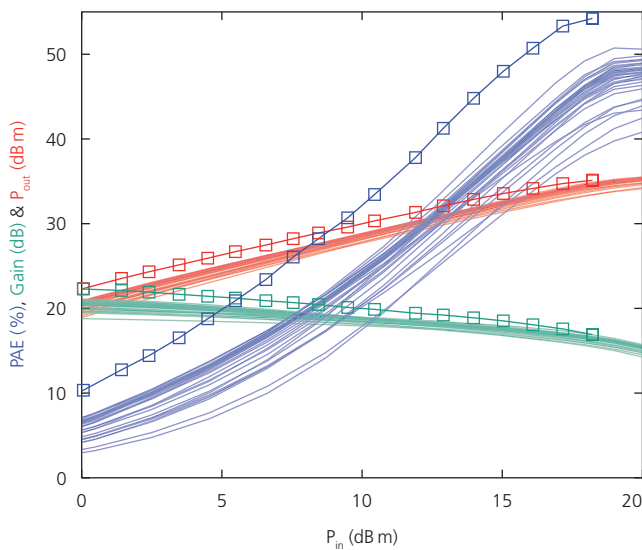
Wärmeleitfähigkeit von Diamant.

Das Fraunhofer IAF entwickelt GaN-Leistungsv Verstärker auf Silizium für hohe Frequenzen bei hohen Ausgangsleistungen. Im Betrieb entsteht in diesen Bauteilen eine hohe Wärmelast, welche die Leistung und die Zuverlässigkeit der Transistoren einschränkt. Das Ersetzen des Siliziumsubstrats (Wärmeleitfähigkeit 149 W/m•K) durch Diamant (2200 W/m•K) verbessert die Kühlung dieser HF-Leistungstransistoren deutlich. Die Herstellung solcher GaN-Diamant-Hybride kann entweder durch direktes Wachstum oder Bonden erfolgen. Beim Wachstum von polykristallinem Diamant auf GaN verhindern schlecht leitende Zwischenschichten an der Grenzfläche die optimale Ableitung der Wärme. Zudem sind die GaN-Strukturen während des Diamantwachstums einem reaktiven

Wasserstoffplasma und hohen Temperaturen ausgesetzt. Im Gegensatz dazu ist die Herstellung der GaN-Diamant-Hybride durch ein Bondverfahren technologisch flexibel, da die Materialien GaN und Diamant unabhängig voneinander hergestellt werden können.

Am Fraunhofer IAF wird ein Bondverfahren für GaN auf Diamant entwickelt, bei welchem Van-der-Waals-Kräfte einen engen Kontakt der Oberflächen realisieren, welcher durch weiteres Ausheizen eine stabile Verbindung ausbildet. Diese Bondtechnologie für AlGaN/GaN-Heterostrukturen wurde für das Bonden auf polykristallinen (PCD) und einkristallinen (SCD) Diamant entwickelt. PCD wird in einer Mikrowellen-Gasphasenabscheidung in einem Wasserstoff/Methan-Plasma auf

deposition in a hydrogen/methane plasma on a Si substrate which was subsequently removed. In the case of SCD commercially available platelets with sizes up to 8x8 mm² were employed. The small surface roughness that is required for direct bonding was achieved by polishing the nucleation side of PCD (roughness ~ 0.6 nm) and SCD (roughness < 0.3 nm). AlGaIn/GaN heterostruc-



2 Load-pull measurements for transistors on Si (lines) and single crystalline diamond (symbols):

PAE (blue), gain (green) and P_{out} (red) at 3 GHz, 50V DC.

Load-Pull-Messungen für Transistoren auf Si (Linien) und SCD (Symbole): PAE (blau), GaN (grün) und P_{out} (rot) bei 3 GHz, 50 V DC.

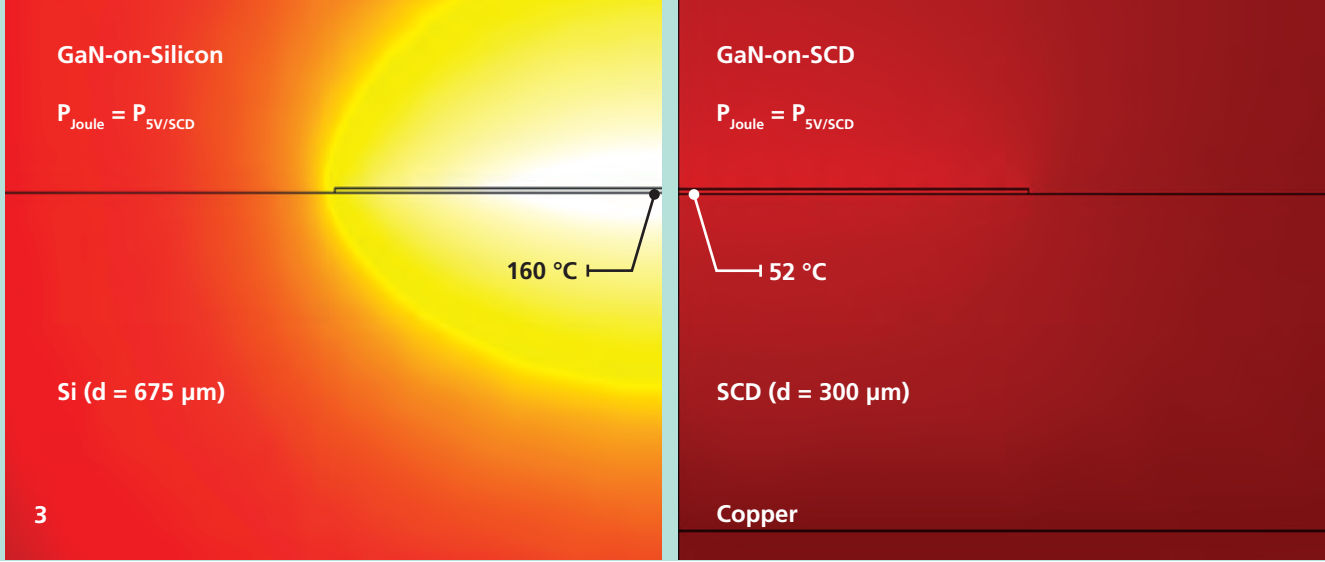
tures were grown by metal-organic chemical vapor deposition on high-resistivity Si substrates. The devices were temporarily bonded to a sapphire carrier and the silicon substrate was removed by wet-chemical etching. Bonding was performed at room temperature and the carrier was removed at elevated temperatures. Finally, GaN/diamond

hybrid chips were soldered to a copper heat sink for further electrical and thermal characterization.

Load-pull measurements of RF transistors with 2x300 μm gate width and 500 nm gate length were performed at 3 GHz with 50 V DC drain bias on both a Si substrate and a bonded SCD heat spreader (Fig. 2). The transistor transferred onto SCD showed higher power added efficiency (PAE) than

an identical GaN-on-Si transistor. At low input power, gain and output power (P_{out}) were slightly increased. These measurements demonstrate that RF transistors can be transferred from Si onto SCD without any noticeable degradation in performance. 2 x 1 mm² AlGaIn/GaN diodes were transferred from Si onto PCD and SCD heat spreaders for operation at higher electric power load (Fig. 1). The diodes (17 μm channel length) have a channel width of 48 mm distributed over 40 fingers. In contrast to gated transistors, lateral diodes have a homogeneous electric field in the channel translating to uniform heat generation. This allows electric modeling of the temperature dependent electron mobility in order to accurately extract channel temperatures. In the I-V plots, the bias voltage (V_{Bias}) was stepwise increased between 0 V and 5 V with 10 s holding time per step in order to achieve a steady heat distribution. Significantly different currents were observed due to the temperature dependent mobility in the 2DEG channel. At 5 V, electric power levels of 32 W, 43 W and 53 W were achieved on Si, PCD, and SCD, respectively. On SCD, the bias could be increased further up to 10 V (130 W) without device degradation.

At 5 V bias voltage channel temperatures were calculated by a thermal finite element analysis (Fig. 3) to be 52 °C, 74 °C, and 160 °C on SCD, PCD, and silicon, respectively. Thus, SCD can clearly realize higher heat dissipation on large area devices than PCD or Si substrates.



3 Simulated temperature distribution for 2 x 1 mm² AlGaInGaN diodes on Si and on SCD with the power load at 5 V.

Simulation der Temperaturverteilung für 2 x 1 mm² AlGaInGaN-Dioden auf Si und auf SCD mit einer Leistungsaufnahme von 5 V.

Siliziumsubstraten aufgewachsen. Um eine freistehende PCD-Schicht zu erhalten, wird das Siliziumsubstrat anschließend entfernt. SCD wird in Größen von bis zu 8 x 8 mm² kommerziell erworben. Die für das direkte Bonden erforderliche niedrige Restrauheit wurde durch Polieren realisiert und dabei Werte von ~0,6 nm auf der Nukleationsseite von PCD bzw. < 0,3 nm auf SCD erreicht. Die AlGaInGaN-Heterostrukturen wurden mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie auf hochresistiven Siliziumsubstraten aufgewachsen. Für den Bondprozess werden diese Bauteile zunächst auf temporäre Trägerwafer (aus Saphir) geklebt und das Siliziumsubstrat nasschemisch entfernt. Der Bondprozess wird bei niedrigen Temperaturen initiiert und die Bindung durch kontinuierliches Steigern der Temperaturen verstärkt. Abschließend wird der Trägerwafer bei hohen Temperaturen entfernt, womit der Transfer der GaN-Bauteile auf Diamant abgeschlossen ist.

Load-Pull-Messungen von HF-Transistoren auf Silizium und auf SCD mit 2 x 300 μm Gateweite und 500 nm Gatelänge wurden bei 3 GHz und 50 V Versorgungsspannung durchgeführt (Abb. 2). Die Effizienz (PAE) war auf SCD gegenüber allen baugleichen Transistoren auf Silizium leicht erhöht. Bei kleiner Eingangsleistung gilt dies auch für die Verstärkung (Gain) und Ausgangsleistung (P_{out}). Es zeigte sich, dass die empfindlichen und komplexen HF-Transistoren durch unseren Bondprozess ohne Verschlechterung

ihrer Kenndaten auf Diamant-Wärmespreizer transferiert werden können.

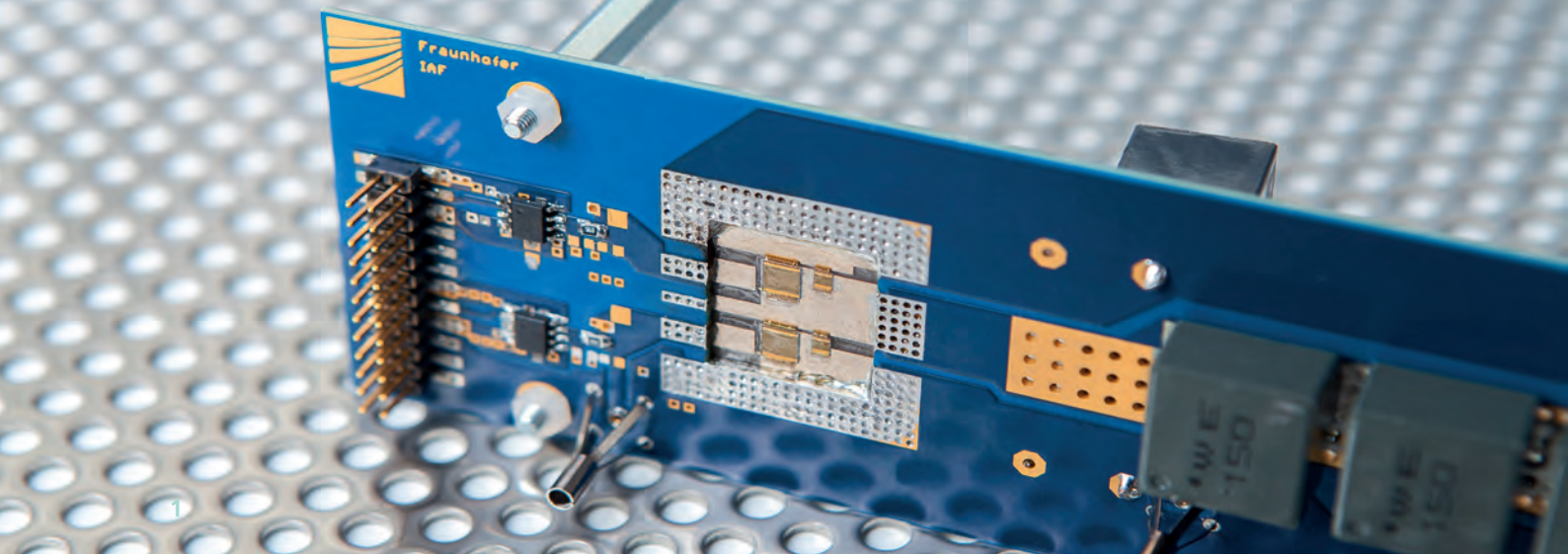
Des Weiteren wurden auf Silizium-Substrat gewachsene laterale AlGaInGaN-Schottky-Dioden auf PCD- und SCD-Wärmespreizer transferiert (Abb. 1). Auf einer Fläche von 2 x 1 mm² ergibt sich über eine Kammstruktur mit 40 Fingern eine Kanalweite von insgesamt 48 μm. Im Gegensatz zu Transistoren entsteht im Diodenkanal ein sehr homogenes elektrisches Feld mit einer gleichmäßigen Verteilung der Wärmelast. Dies vereinfacht die Modellierung des elektrischen Transports und die Bestimmung der Temperatur über die temperaturabhängige Mobilität des zweidimensionalen Elektronengases. Bei 5 V Diodenspannung werden aufgrund unterschiedlicher Kanaltemperaturen elektrische Leistungen von 32 W (Silizium), 43 W (PCD) und 53 W (SCD) erreicht. Auf SCD konnte die Leistung bei akzeptablen Temperaturen auf 130 W (10 V Diodenspannung) gesteigert werden.

Die Temperatur und ihre Verteilung über eine 3D-Finite-Elemente-Simulation aus den experimentell gemessenen Leistungen wurde berechnet (Abb. 3). Die Analyse für die bei 5 V Spannung ermittelten Leistungen ergab Temperaturen von 52 °C (SCD), 74 °C (PCD) und 160 °C (Silizium). Folglich kann die bei elektrischer Belastung entstehende Wärme auf SCD deutlich besser abgeleitet werden als auf PCD oder Siliziumsubstraten.

2 x 1
mm²

Size of the largest transferred power device.

Abmessungen des größten transferierten Leistungsbaulements.



GaN Electronics for Defence Applications

Rüdiger Quay – ruediger.quay@iaf.fraunhofer.de

Scaling the gatelength of GaN-based field-effect transistors to below 100 nm in combination with the development of an advanced epitaxial layer design leads to significant advancements in the application space of microwave and mm-wave power and low-noise amplifiers. The development and scaling of the semiconductor devices is accompanied by a strong improvement in the reliability of devices with a gatelength of 100 nm and below. Fast switching power converters based on GaN-on-silicon switch technology with power levels of more than 3 kW and conversion efficiencies exceeding 94 % can be demonstrated.

1 Compact 3 kW power converter module.

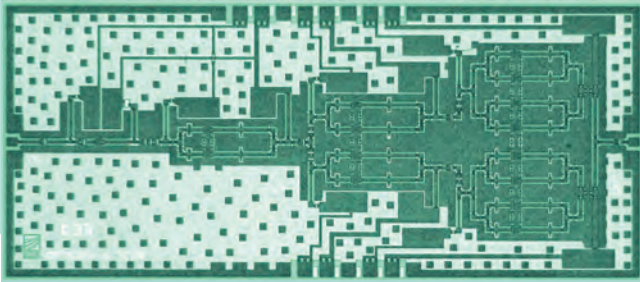
Kompaktes 3 kW-Leistungswandler-Modul.

Advancements in gallium nitride integrated circuit technology have a strong impact on the performance of mobile microwave systems, e.g. for radar, secondary radar, electronic countermeasures and communication links. A large number of state-of-the-art RF systems deployed in the last five years employ some kind of GaN transistors and integrated circuits (IC) to achieve higher output power levels, smaller form factors, higher system reliability, and lower overall costs.

Power gain and efficiency are key parameters, which enable new applications with higher system flexibility, less cooling effort, and larger bandwidth. Within the R&D program SysGaN Fraunhofer IAF develops key GaN technologies for future subsystems. For this purpose, significant progress has recently been achieved in improving the bandwidth

of integrated RF circuits to at least 110 GHz, as well as in enhancing the gain and the efficiency at high frequencies, and most importantly, improving the reliability of short gatelength devices.

Currently we develop transistors with gatelengths of 100 nm and 50 nm and explore new epitaxial concepts. Both binary AlN/GaN heterostructures as well as AlGaN/GaN heterostructures featuring a high aluminum content have been compared and improved. With this improvement and new epitaxial layer concepts leading to layer sequences with very thin individual layers (< 5 nm thickness), RF power densities as high as 3 W/mm were successfully realized for gatelengths of 100 nm and below. Devices with a gatelength as low as 50 nm were recently realized with a cut-off frequency in the range of 130 GHz.



- Integrated circuits
- GaN beyond 110 GHz
- Power converter
- Device reliability

GaN-Elektronik für Verteidigungsanwendungen

> 1.44
W

*Output power at 90 GHz.
Ausgangsleistung bei 90 GHz.*

Die Skalierung der Gatelänge zu Werten unterhalb von 100 nm für GaN-Feld-effekttransistoren in Kombination mit der Entwicklung neuer Heterostrukturen führt zu einer signifikanten Erweiterung des Anwendungsraumes von Mikrowellen- und mm-Wellen-Verstärkern sowohl für die Sendeseite (Leistungsverstärker) als auch für die Empfangsseite (rauscharme Empfangsverstärker). Diese Entwicklung und Skalierung der Halbleiterbauelemente wird begleitet von einer starken Verbesserung der Zuverlässigkeit für Gatelängen von unterhalb 100 nm. Weiterhin werden schnellschaltende Leistungswandler auf der Basis einer GaN-auf-Silizium-Schaltertechnologie demonstriert mit Leistungspegeln von mehr als 3 kW bei einer Effizienz von 94 %.

Fortschritte in der Galliumnitrid-Schaltungstechnologie haben einen starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von mobilen Mikrowellensystemen, zum Beispiel für Radare, Sekundärradare, elektronische Gegenmaßnahmen und Kommunikationslinks.

Eine große Zahl von modernen Hochfrequenzsystemen, die in den vergangenen Jahren eingeführt wurden, enthalten bereits GaN-Transistoren und GaN-basierte integrierte Schaltungen (ICs) in der einen oder anderen Form, um höhere Ausgangsleistungen, kleinere Formfaktoren, höhere Systemzuverlässigkeit und niedrigere Gesamtkosten zu erreichen. Leistungsverstärkung und Leistungseffizienz sind dabei Schlüsselparameter, welche neue Anwendungen mit höherer Systemflexibilität, weniger Kühlaufwand und größerer Bandbreite ermöglichen.

> 130
GHz

*Maximum IC operating
frequency of GaN.
Höchste IC-Betriebs-
frequenz von GaN.*

Innerhalb des Forschungsprojektes SysGaN entwickelt das Fraunhofer IAF Schlüsseltechnologien für zukünftige Subsysteme. Hierbei wurden jüngst Fortschritte erzielt bei der Erhöhung der Bandbreite von GaN-basierten Hochfrequenzschaltungen jenseits der 110 GHz, bei der Erhöhung der Verstärkung und der Effizienz bei hohen Frequenzen bei gleichzeitiger Erhöhung der Zuverlässigkeit von Bauelementen kurzer Gatelängen.

Gegenwärtig werden am Fraunhofer IAF Bauelemente mit Gatelängen von 100 nm bis 50 nm realisiert. Parallel wurden neue epitaktische Konzepte bewertet. Sowohl binäre AlN/GaN-Heterostrukturen als auch AlGaIn/GaN-Heterostrukturen mit hohem Aluminiumgehalt wurden verglichen und verbessert.

The advancements in gain and speed are accompanied by strong improvements in device reliability. Recent tests of devices with 100 nm gatelength realized within the project yield extrapolated lifetimes of 10^5 h at a temperature of 125 °C when operated at a voltage of 15 V.

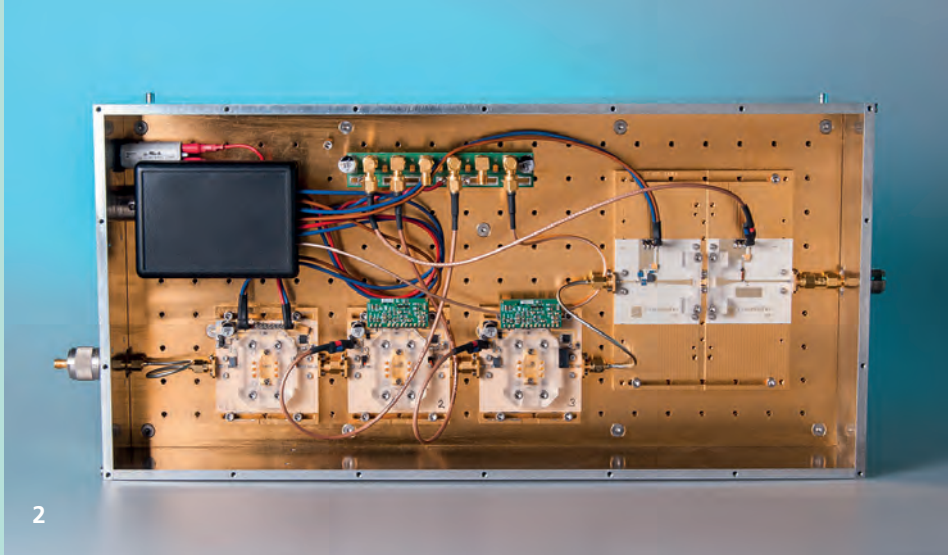
On an integrated circuit level (MMIC), several ICs were designed and realized to enhance the output power per chip, e.g. for radar applications at approximately 94 GHz. The picture on page 33 shows an MMIC which delivers more than 1.44 W output power at 90 GHz with a gain of 20 dB and a power added efficiency of 10 %. The four-stage amplifier covers a chip area of just 4.5 x 2 mm².

Further MMICs include GaN low-noise amplifier ICs for operating frequencies as high as 130 GHz based on the same technology. The low-noise amplifier yields a gain as high as 35 dB at W-band (75 GHz–110 GHz) and D-band (110 GHz–170 GHz) frequencies. This is the first time in Europe that D-band operation with GaN ICs has been demonstrated, and the second time worldwide, with similar results being reported by HRL Laboratories in Malibu, CA, USA.

For highly-compact power converters, Fraunhofer IAF further investigates the use of GaN-on-silicon substrate switches for fast switching power converters. Fig. 1 shows a soft-switching synchronous buck converter module based on a GaN switch with an overall gatewidth as large as 367 mm.

In pulsed operation, a maximum current capability of 150 A at a voltage of 600 V can be achieved. Fast transients reducing the switching losses of the power converter and enabling an extremely compact overall size are special characteristics of our devices. When operated in synchronous mode, the buck converter yields an output power as high as 3 kW at an efficiency level of 94 % with a related duty cycle of 50 %.

These advancements pave the way for further improvements in mobile system performance. New system concepts can be explored, e.g. for far-reaching remote sensing exploiting mm-waves, for high-speed communication links and for rugged receiver systems. Future activities within the program will be dedicated to achieve even higher power levels per chip at 94 GHz, and to reaching MMIC operation at frequencies of up to 200 GHz.



2 Flexible broadband jammer system based on GaN technology.
Flexibler breitbandiger Störsender (»Jammer«) auf Basis der GaN-Technologie.

Mit der Verbesserung der epitaktischen Wachstumsmethoden und unter Verwendung neuer epitaktischer Konzepte, die zu sehr geringen Dicken einzelner Schichten von < 5 nm führen, wurden Hochfrequenzleistungsdichten von 3 W/mm für Gatelängen von 100 nm und darunter erreicht. Bauelemente der Gatelänge 50 nm erreichten jüngst Grenzfrequenzen von 130 GHz. Diese Verbesserungen von Verstärkung und Geschwindigkeit wurden begleitet von Verbesserungen der Bauelementzuverlässigkeit. Tests von Bauelementen mit einer Gatelänge von 100 nm zeigen extrapolierte Lebensdauern von 10^5 h bei einer Kanaltemperatur von 125 °C und einer Spannung von 15 V.

Das ist das erste Mal, dass D-Band-Betrieb in Europa nachgewiesen wurde, und bislang weltweit erst das zweite Mal: Gleichwertige Ergebnisse wurden bislang nur von den HRL Laboratories in Malibu, CA, USA gezeigt.

Für hochkompakte Leistungswandler untersucht das Fraunhofer IAF den Nutzen von GaN-auf Silizium-Substraten für schnellschaltende Leistungswandler. Abb. 1 zeigt ein synchrones weichschaltendes Buck-Wandler-Modul auf der Basis eines GaN-Schalters mit einer Gateweite von 367 nm. Im Pulsbetrieb wird ein maximaler Strom von 150 A bei einer Spannung von 600 V erreicht.

> 3
kW

Converted power at 75 kHz with 94% efficiency.
Umgewandelte Leistung bei 75 kHz mit einem Wirkungsgrad von 94%.

Auf der Ebene der integrierten Schaltungen (MMICs) wurden mehrere Schaltungen entworfen und realisiert mit dem Ziel, die Ausgangsleistung pro Chip zu erhöhen, z. B. für Radaranwendungen bei 94 GHz. Das Chipfoto auf S. 33 zeigt einen MMIC mit einer Hochfrequenzleistung von 1,44 W bei einer Frequenz von 90 GHz, einer Verstärkung von 20 dB und einer Leistungseffizienz von 10 %. Der vierstufige IC hat eine Chipfläche von $4,5 \times 2 \text{ mm}^2$.

Typisch für unsere Bauelemente sind schnelle Transienten zur Reduktion der Schaltverluste, die sehr kleine Volumina pro geschalteter Leistung ermöglichen. Im synchronen Betrieb zeigt der Wandler eine Ausgangsleistung von 3 kW mit einer Effizienz von 94 % bei einem Tastverhältnis von 50 %.

Weitere MMICs beinhalten rauscharme Verstärker mit Betriebsfrequenzen bis 130 GHz auf der Basis derselben Technologie. Die rauscharmen Verstärker haben eine Verstärkung von 35 dB im W-Band (75 GHz – 110 GHz) und D-Band (110 GHz – 170 GHz).

Diese Fortschritte ebnen den Weg für Verbesserungen in mobilen Systemen. Neue Systemkonzepte können so bewertet werden, z. B. für Fernerkundung mittels mm-Wellen-Radar, für hochbitratige Kommunikationsverbindungen und für robuste Empfängersysteme. Weitere Aktivitäten im Programm haben noch höhere Ausgangsleistungen pro Chip bei 94 GHz zum Ziel sowie das Erreichen eines GaN-MMIC-Betriebs bei 200 GHz.



Optoelectronics

Optoelektronik

- 38 Pilot Production of Miniaturized Tunable Infrared Lasers**
Pilotfertigung miniaturisierter Wellenlängen-abstimmbarer Infrarot-Laser
- 42 2 μm SDL-Pumped Ho:YAG Laser**
2 μm SDL-gepumpter Ho:YAG-Laser
- 46 Self-adaptive LED Modules for Camouflage in the Visible**
Selbstadaptive LED-Module für Tarnung im Sichtbaren
- 50 Solar-Blind Avalanche Photodiodes**
Sonnenlichtunempfindliche Avalanche-Photodioden
- 54 Planar InGaAs SWIR Photodiodes**
Planare InGaAs-SWIR-Photodioden



We develop photodetectors and semiconductor lasers primarily for the infrared spectral range. We tailor our laser modules to our customers' requirements – for instance optically pumped semiconductor disk lasers for medical applications, or quantum cascade lasers for spectroscopic sensing. LED modules are also part of our portfolio. With regard to infrared photo detectors, we focus on matrix and single element detectors. To detect extremely weak optical signals, we develop high sensitivity avalanche photodiodes (APDs) with internal gain.

Im Bereich der Optoelektronik entwickeln wir Photodetektoren und Halbleiterlaser schwerpunktmäßig für den infraroten Spektralbereich. Unsere Laser entwickeln wir kundenspezifisch weiter – so z. B. optisch gepumpte Halbleiterscheibenlaser für medizinische Anwendungen oder Quantenkaskadenlaser für die spektroskopische Sensorik. Auch LED-Module sind Teil unseres Forschungsportfolios. Bei den Infrarot-Photodetektoren liegt unser Fokus auf Matrix- und Einzel-detektoren. Für die Detektion äußerst schwacher optischer Signale entwickeln wir hochempfindliche Avalanche-Photodioden (APDs) mit interner Signalverstärkung.



1

Pilot Production of Miniaturized Tunable Infrared Lasers

Ralf Ostendorf – ralf.ostendorf@iaf.fraunhofer.de

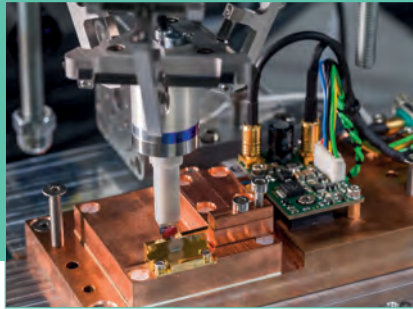
Fraunhofer IAF, together with its partner Institute Fraunhofer IPMS, has been working on the development of a miniaturized light source for mid-infrared (MIR) spectroscopic applications. The light source named μ EC-QCL combines a quantum cascade laser chip and an integrated MOEMS scanning grating for wavelength selection in external cavity configuration, allowing for a complete wavelength scan over more than 300 cm^{-1} in less than 1 ms. The μ EC-QCL is a key component of the European pilot line project »MIRPHAB« offering the development and pilot production of mid-infrared photonics sensor solutions. Assisted by Fraunhofer IPT, a robust and scalable assembly technique for this miniaturized optical system is developed and implemented at Fraunhofer IAF in order to offer customers a swift access to this technology.

1 *Quantum cascade laser chip on submount with aligned and mounted micro-lens for collimation. Quantenkaskadenlaser-Chip auf Submount mit ausgerichteter und verklebter Mikrolinse zur Kollimation.*

The mid-infrared wavelength regime from 4 to $12\text{ }\mu\text{m}$ is of particular interest for spectroscopic applications as this spectral range contains the combined basic rotational-vibrational modes of many chemical substances. The resulting absorption bands are characteristic as a fingerprint, and thus allow for unequivocal identification of chemical compounds. At Fraunhofer IAF we have developed, in close cooperation with Fraunhofer IPMS, a laser source named μ EC-QCL. Emitting in the mid-IR wavelength regime, it enables broad spectral tuning at high scan frequencies. This is achieved by combining a quantum cascade laser chip in an external cavity setup with a MOEMS scanning

grating as wavelength selective element. This approach allows for spectral tuning ranges of more than 300 cm^{-1} and scan frequencies as high as 1 kHz, i. e. one complete wavelength scan is performed in less than 1 ms.

The swift spectral tunability of this laser source bears an enormous potential to realize real-time mid-IR sensing systems. A number of very promising results for applications in the industrial and pharmaceutical process analysis, such as quality control of coatings or identification of various pharmaceutical ingredients, have already been demonstrated at Fraunhofer IAF's inhouse application laboratory.



- Spectrally tunable quantum cascade laser
- Pilot production
- MEMS component
- Mid-infrared spectral range

Pilotfertigung miniaturisierter Wellenlängen-abstimmbarer Infrarot-Laser

300
 cm^{-1}

Spectral tuning range.

Spektraler Durchstimmbereich.

Gemeinsam mit dem Fraunhofer IPMS hat das Fraunhofer IAF in den vergangenen Jahren eine miniaturisierte Laserquelle entwickelt, die für Spektroskopie und Sensorik im mittleren infraroten (MIR) Spektralbereich eingesetzt werden kann. Die » $\mu\text{EC-QCL}$ « genannte Lichtquelle vereint einen Quantenkaskadenlaser und ein Beugungsgitter, das, in einen MOEMS-Scanner integriert, als wellenlängenselektives Element eines externen Resonators fungiert. Diese Laserquelle ist ein zentraler Teil des Angebots der europäischen Pilotlinie »MIRPHAB«, welche die kundenspezifische Entwicklung und Fertigung von MIR-Sensorsystemen anbietet. Im Rahmen dieses Projekts entwickelt und optimiert das Fraunhofer IAF zurzeit gemeinsam mit dem Fraunhofer IPT die Herstellungsprozesse des $\mu\text{EC-QCL}$, um Kunden der Pilotlinie einen kostengünstigen und schnellen Zugriff auf diese Technologie zu gewähren.

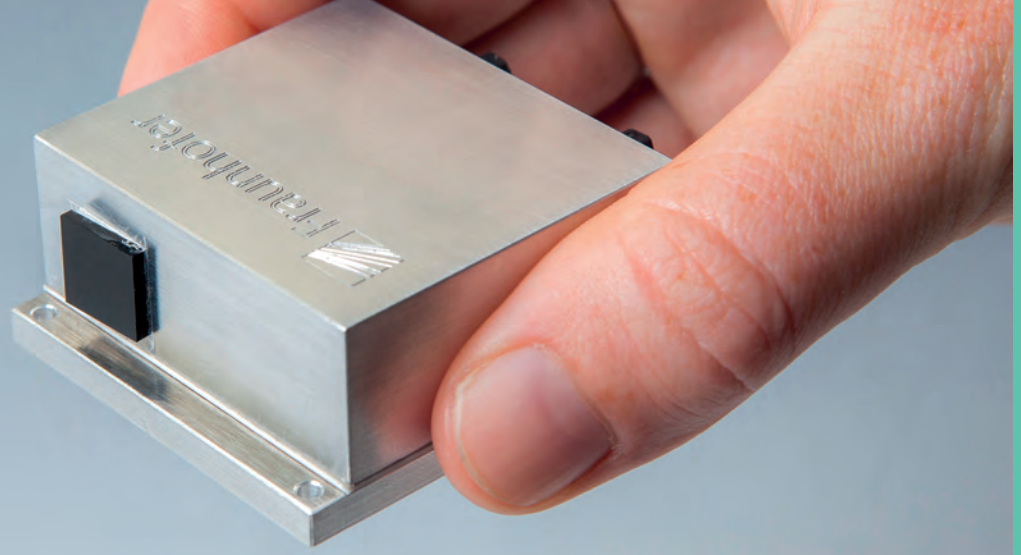
Der MIR-Wellenlängenbereich von 4 bis 12 μm ist von besonderem Interesse für eine Vielzahl spektroskopischer Anwendungen, da die Grundmoden der Molekülschwingungen zahlreicher chemischer Verbindungen dort liegen. Die Absorptionsbanden in diesem Spektralbereich sind charakteristisch wie ein menschlicher Fingerabdruck und erlauben somit die eindeutige Identifizierung chemischer Substanzen. Am Fraunhofer IAF haben wir in Kooperation mit dem Fraunhofer IPMS eine kompakte Halbleiterlaserquelle entwickelt, die im MIR-Spektralbereich emittiert und dabei mit hohen Scanfrequenzen über einen sehr weiten Wellenlängenbereich durchgestimmt werden kann. Dies wird erreicht durch die Kombination eines Quantenkaskadenlasers in einem externen

Resonator mit einem MOEMS-basierten Gitterscanner, der als wellenlängenselektives Element wirkt. Auf diese Weise kann ein spektraler Durchstimmbereich von mehr als 300 cm^{-1} mit einer Scanfrequenz bis zu 1 kHz überstrichen werden. Ein kompletter Wellenlängenscan erfolgt somit in weniger als 1 ms. Die hohe Geschwindigkeit der Wellenlängenabstimmung des $\mu\text{EC-QCL}$ birgt ein enormes Potenzial für die Entwicklung hierauf basierender, echtzeitfähiger Sensorsysteme im mittleren infraroten Spektralbereich. Sowohl bei der industriellen und pharmazeutischen Prozessanalytik als auch bei der Identifizierung von Arzneimittelwirkstoffen konnten bereits eindrucksvolle Anwendungsbeispiele im hauseigenen Applikationslabor demonstriert werden.

1
 ms

for one complete wavelength scan.

für einen kompletten Wellenlängenscan.



2 Miniaturized wavelength-tunable μ EC-QCL.

Miniaturisierter, spektral abstimmbarer μ EC-QCL.

European Pilot Line »MIRPHAB«

The μ EC-QCL is a key offering of the European pilot line »Mid-infrared photonic devices fabrication for chemical sensing« (MIRPHAB). This EU-funded project facilitates the development and supply of mid-IR photonic sensors and serves as a single access point to the best technology, provided by a consortium of leading companies and research institutes in the field of photonics. Within the framework of MIRPHAB, Fraunhofer IAF, IPMS and IPT have been working on the miniaturization and industrialization of the μ EC-QCL (Fig. 2).

The μ EC-QCL module realized within MIRPHAB not only contains the quantum cascade laser chip and the external cavity with the MOEMS scanning grating, but also the driving electronics for the laser chip, the control electronics for the MOEMS grating as well as a temperature sensor. A separate electronic board developed by Fraunhofer IPMS with the approximate size of a credit card provides temperature control, the necessary power levels and trigger signals. Furthermore, it synchronizes the oscillation of the MOEMS grating with the laser pulses to ensure wavelength stability and reproducibility during spectral tuning. The μ EC-QCL can be fully controlled via a micro USB port and a software API.

Pilot line manufacturing of the μ EC-QCL

A key aspect of MIRPHAB is to provide quick and easy access to the MIR sensing technologies for customers. In order to offer a scalable and robust assembly technique of MIR photonic components for sensing systems within MIRPHAB, Fraunhofer IAF and IPT have been working on developing and optimizing the manufacturing processes for μ EC-QCLs.

For this purpose, an optical platform providing mechanical stability as well as sufficient heat conductivity was developed and an appropriate joining technology was chosen for each component of this optical system. A semi-automatic active alignment setup was established at Fraunhofer IAF, using a proprietary six-axis piezo-driven micromanipulator developed by Fraunhofer IPT. This setup allows to align and bond the micro-optical components, such as collimation lenses, and the MOEMS scanning grating with an accuracy below 0.1 μ m. The optical components are pre-aligned using visual cameras and then actively aligned with the laser beam on, using power detectors, beam diagnostic tools as well as a fast spectrometer setup. Currently, the necessary alignment algorithms are developed and tested in order to enable a semi-automatic alignment. This will help to significantly reduce lead times and manufacturing costs of the μ EC-QCL. First modules of the μ EC-QCL have already been assembled using this technique and are currently tested.

Europäische Pilotlinie »MIRPHAB«

Der μ EC-QCL ist eine zentrale photonische Komponente der Pilotlinie MIRPHAB. Dieses von der EU geförderte Projekt ist aufgestellt als eine länderübergreifende Pilotlinie mit dem Ziel, kundenspezifische optische Sensorik im MIR-Spektralbereich zu entwickeln und bereitzustellen. Dabei fungiert MIRPHAB als zentraler Ansprechpartner und Anlaufpunkt für Early Adopters zu innovativen photonischen Technologien, die von einem breiten Konsortium aus führenden Firmen und Forschungsinstituten bereitgestellt werden. Im Rahmen von MIRPHAB haben das Fraunhofer IAF, IPMS und IPT an der weiteren Miniaturisierung des μ EC-QCLs gearbeitet (Abb. 2).

Dabei beinhaltet das μ EC-QCL Modul nicht nur den QCL-Chip im externen Resonator mit dem MOEMS-Gitterscanner, sondern auch die notwendige Treiberelektronik, die den Laserchip mit Strom versorgt, die Sensorelektronik zur Bestimmung der Gitterstellung und einen Temperatursensor. Eine vom Fraunhofer IPMS entwickelte Elektronikplatine in der Größe einer Kreditkarte regelt die Temperatur des Lasers, liefert die Versorgungsspannung und Triggersignale und synchronisiert darüber hinaus die Oszillation des MOEMS-Scanners mit den Laserpulsen, um die Wellenlängenstabilität und Reproduzierbarkeit während des spektralen Durchstimmens zu gewährleisten. Der μ EC-QCL kann vollständig über einen Micro-USB-Anschluss und eine Software-API gesteuert werden.

Pilotfertigung des μ EC-QCL

Um innerhalb von MIRPHAB eine auf Pilotserien skalierbare und robuste Montagetechnologie für die Laserquelle bieten zu können, haben das Fraunhofer IAF und Fraunhofer IPT gemeinsam an der Entwicklung und Optimierung der Fertigungsschritte für den μ EC-QCL gearbeitet.

Hierfür wurde eine optische Plattform mit hoher mechanischer Stabilität und Wärmeleitfähigkeit entwickelt und eine angepasste Fügetechnik für die einzelnen Komponenten des optischen Systems ausgewählt. Dazu wurde ein halbautomatischer, aktiver Justageplatz mit einem Sechs-Achsen-Mikromanipulator vom Fraunhofer IPT am Fraunhofer IAF eingerichtet. Dieser ermöglicht die Justage und das Zusammenfügen der mikro-optischen Komponenten wie den Kollimationslinsen und dem MOEMS-Gitterscanner mit einer Positioniergenauigkeit von weniger als $0,1 \mu\text{m}$. Die optischen Komponenten werden mit einem Kamerasystem eingerichtet und anschließend aktiv im Laserbetrieb nachjustiert. Der Fokus liegt dabei auf der Ausgangsleistung, der Strahlqualität und der Wellenlänge. Zurzeit werden die dafür notwendigen Justagealgorithmen entwickelt und getestet.

Der automatisierte Justage- und Fügeprozess trägt dazu bei, die Fertigungszeit des μ EC-QCLs drastisch zu reduzieren und somit die Herstellungskosten deutlich zu senken.

45 x 61
mm²

Footprint of the miniaturized tunable MIR laser source.

Grundfläche der miniaturisierten MIR-Laserquelle.



2 μm SDL-Pumped Ho:YAG Laser

Peter Holl – peter.holl@iaf.fraunhofer.de

Medical applications like laser scalpels for high precision surgery call for near-to-mid-infrared laser sources with pulse energies in the several mJ range. To meet this demand, Fraunhofer IAF and LISA laser products have developed a laser source, which is based on a Q-switched Holmium laser and pumped by a GaSb-based semiconductor disk laser. With this approach it is possible to convert the multiple-watt continuous wave output powers of semiconductor disk lasers to short pulses with several mJ of pulse energy.

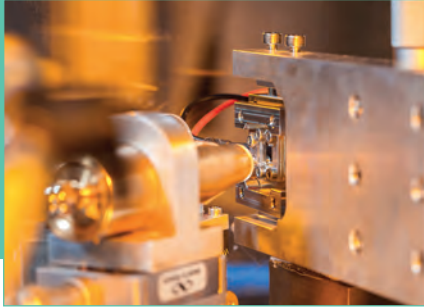
1 *Medical applications like laser scalpels call for laser sources with high pulse energy.*

Für Anwendungen in der Medizintechnik wie Laser-skalpelle werden Laser mit hoher Pulsenergie benötigt.

Medical applications like laser scalpels use the energy delivered from a laser source to evaporate or coagulate human tissue. For several surgical interventions it is favorable to use a pulsed laser source instead of continuous wave radiation because this reduces the thermal load on surrounding tissue. The direct output of a semiconductor disk laser (SDL) is not very well suited for this task, as they deliver several watts of continuous wave output power in combination with a circular beam profile and excellent beam quality, but they lack the ability to generate high-energy pulses. Holmium-doped oxides (such as Ho:YAG) as gain material on the other hand can store energy very efficiently and then release this energy in a single laser pulse. Additionally, this laser type emits at a wavelength of 2.1 μm , which is ideal for a use as laser scalpels, as the water absorption at this wavelength is very high. Holmium lasers, which need to be pumped at a wavelength around 1.9 μm , can therefore be used to

efficiently convert the high cw output power of SDLs to short pulses with high pulse energies. In close cooperation with LISA laser in Göttingen, Fraunhofer IAF has developed different SDL-based pumping concepts for Holmium lasers.

Until now, all commercially available pulsed Ho lasers are pumped with flashlamps, which leads to powerful but very inefficient laser systems. New pumping concepts use GaSb-based diode laser stacks as a pump source, but these solutions suffer from the low beam quality and wavelength drift of these pump sources. For efficient pumping it is necessary to match the pumped volume in the Ho-doped crystal to the laser mode of the Ho resonator. The excellent beam quality of SDLs offers a great advantage for this task. The most straightforward approach to pump a Ho-doped crystal with a SDL is to focus the SDL emission into the crystal through the resonator end mirror of the Ho laser



- Solid state laser pumped by semiconductor laser
- Infrared laser emission
- Laser scalpel
- High pulse energy
- Q-switch

2 μm SDL-gepumpter Ho:YAG-Laser

In der Chirurgie werden für Präzisionsoperationen Laser-Skalpelle mit hoher Pulsenergie im Bereich einiger mJ im mittleren Infrarot-Wellenlängenbereich benötigt. Daher hat das Fraunhofer IAF zusammen mit LISA laser products eine Laserlichtquelle entwickelt, die auf einem gütegeschalteten Holmium-Laser (Ho-Laser) basiert, der von einem auf GaSb-basierenden Halbleiter-Scheibenlaser gepumpt wird. Mit diesem Aufbau ist es möglich, die hohe Dauerstrichleistung des Halbleiter-Scheibenlasers im Bereich mehrerer Watt in kurze Pulse mit mehreren mJ an Puls-Energie umzuwandeln.

3.3 mJ

*Maximum pulse energy of
the developed SDL-pumped
Holmium laser.*

*Maximale Pulsenergie des
entwickelten SDL-gepumpten
Holmium-Lasers.*

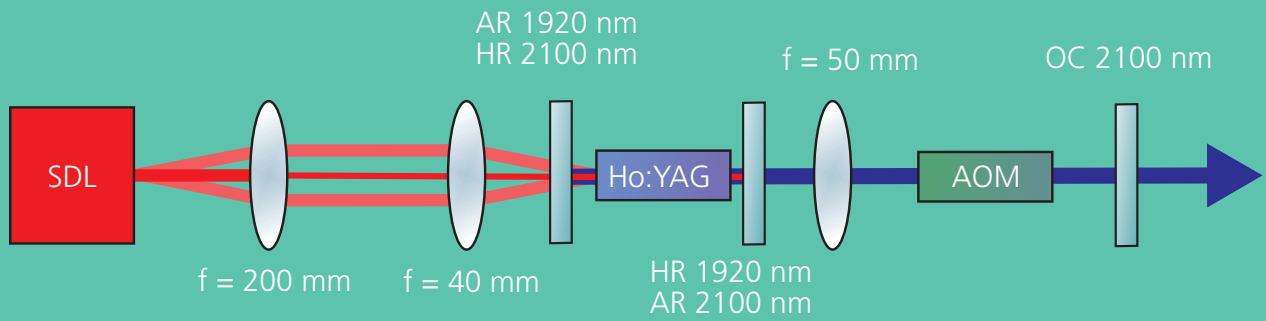
In medizinischen Anwendungen wie Laser-Skalpellen wird eine Laserquelle genutzt, um Gewebe zu verdampfen oder zu veröden. Für einige operative Eingriffe ist es vorteilhaft, eine gepulste Laserquelle anstatt einer mit Dauerstrich-Emission zu verwenden, da dies die thermische Last auf das umliegende Gewebe reduziert. Die direkte Laseremission eines Halbleiter-Scheibenlasers (SDL) ist für diese Anwendung nicht gut geeignet, da SDLs im Dauerstrichbetrieb zwar hohe Ausgangsleistungen mit einem zirkularen Strahlprofil und ausgezeichneter Strahlqualität vereinen, jedoch keine hochenergetischen Pulse generieren können. Holmium-dotierte Oxide (z. B. Ho:YAG) hingegen können Energie sehr effizient speichern und dann in einem einzelnen Laserpuls freisetzen. Dieser Lasertyp emittiert zudem bei einer Wellenlänge von 2,1 μm , welche sich ideal für den Einsatz als Laserskalpell anbietet. Ho-Laser, die bei 1,9 μm gepumpt werden, können

daher als Konverter für die hohe Dauerstrichleistung von SDLs in kurze Laserpulse mit hoher Pulsenergie genutzt werden. In enger Kooperation mit LISA laser in Göttingen hat das Fraunhofer IAF SDL-basierte Pumpkonzepte für Ho-Laser erarbeitet.

Bisher werden alle kommerziell erhältlichen gepulsten Ho-Laser mit Blitzlampen gepumpt. Dieses Pumpschema kann zwar für leistungsstarke Lasersysteme genutzt werden, allerdings sind diese ineffizient. Neuere Ansätze nutzen GaSb-basierte Diodenlaser-Stacks als Pumpquelle, die jedoch eine schlechte Strahlqualität und starke Wellenlängendrifts aufweisen. Um effizient zu pumpen, muss das gepumpte Kristallvolumen des Ho-dotierten Kristalls mit der Lasermode des Ho-Resonators zur Deckung gebracht werden. Die exzellente Strahlqualität von SDLs ist hierfür ein großer Vorteil. Die Standard-Pumpkonfiguration für den Großteil aller Festkörperlaser



LISA LASER PRODUCTS
COMPETENCE IN SURGICAL LASER



2

2 Schematic of the laser resonator setup for extra-cavity pumping.

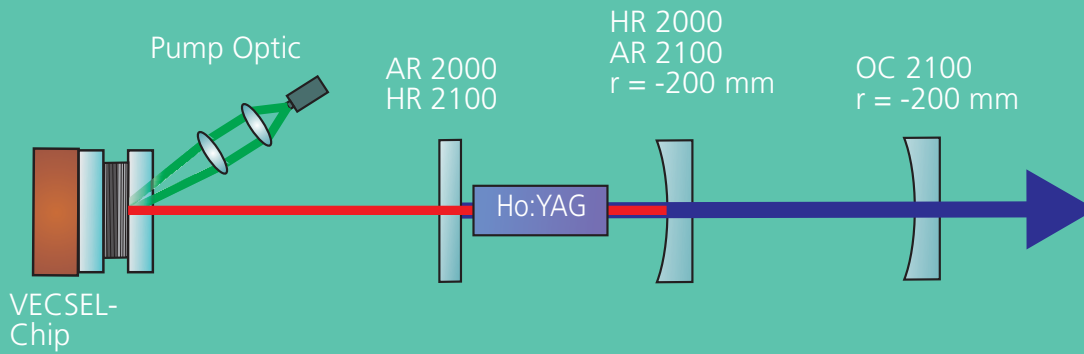
Darstellung der verwendeten Laserresonatorkonfiguration für resonatorexternes Pumpen.

cavity, as shown schematically in Fig. 2. In this configuration, the cavity of the SDL pump laser does not overlap with the one of the Ho laser; therefore this setup is also called extra-cavity pumping. This is the standard pumping configuration for the majority of solid state lasers. The advantage of this setup is the possibility to optimize the Ho laser and the SDL independently, which significantly facilitates the design and alignment of this configuration. Fraunhofer IAF has developed a SDL with an emission wavelength, that is stabilized to a Ho absorption peak at 1.92 μm and that reaches a maximum output power of 3.4 W without wavelength shifts over the whole output power range. This ensures a constant and efficient absorption of the pump power delivered by the SDL in the Ho crystal. As a result, the SDL-pumped Ho laser showed an excellent conversion efficiency of up to 60 % (differential efficiency) in continuous wave operation and up to 47 % in stable pulsed Q-switched operation with low pulse-to-pulse fluctuations. Pulse energies up to 3.3 mJ at 110 ns pulse duration were achieved. Even shorter pulse durations of 32 ns at 0.45 mJ pulse energy were demonstrated with a slightly modified resonator configuration.

The concept of intra-cavity pumping, i. e. placing the Ho-doped crystal inside the SDL cavity, enables very compact laser systems with only a minimum of optical elements. Furthermore, this concept automatically leads

to a very uniform pump profile inside the Ho crystal due to the multipass absorption inside the SDL cavity. In this case we took a different approach to wavelength-locking of the pump laser: we adjusted the doping level and length of the Ho crystal so that the SDL is intrinsically locked to an absorption minimum of Holmium, omitting the need for additional wavelength selective filters within the cavity. A schematic drawing of the overlapping SDL/Ho cavities is shown in Fig. 3. The SDL chip used for this experiment had a slightly longer emission wavelength (around 1.98 μm) and was mounted with an improved technology that resulted in a continuous wave output power of more than 16 W in a standard linear cavity. The intracavity-pumped Ho laser showed a maximum output power of 4.4 W in continuous wave operation. First experiments with Q-switching in this setup showed pulse energies up to 0.5 mJ. Future optimizations and experiments are expected to result in even higher pulse energies. This joint development of Fraunhofer IAF and LISA laser represents the first realization of an intracavity SDL-pumped Ho laser.

First application tests at LISA laser on hard and soft tissue as well as on transparent plastics in the visual have shown the potential of these Q-switched Holmium lasers for future laser scalpels. In addition, further optimization strands required for productive use and product development have been identified.



3

3 Resonator setup for the intracavity pumping scheme.

Resonatorgeometrie für resonatorinternes optisches Pumpen.

wird umgesetzt, indem die SDL-Emission durch den Endspiegel des Ho-Resonators in den Kristall fokussiert wird (Abb. 2). In dieser Konfiguration gibt es keinen Überlapp des SDL-Resonators mit dem Ho-Resonator, weshalb dieser Aufbau auch »resonator-externes Pumpen« genannt wird. Der Vorteil dieses Aufbaus ist, dass der Ho-Laser und der SDL unabhängig voneinander optimiert werden können, was Entwurf und Justage dieser Konfiguration deutlich erleichtert. Das Fraunhofer IAF hat einen SDL entwickelt, dessen Emissionswellenlänge auf ein Absorptionsmaximum von Holmium bei $1,92 \mu\text{m}$ stabilisiert wird. Ohne Wellenlängenänderung erreicht dieser eine maximale Ausgangsleistung von $3,4 \text{ W}$. Eine konstante und effiziente Absorption der Pumpleistung des SDLs im Ho:YAG-Kristall kann so sichergestellt werden. Infolgedessen zeigt der SDL-gepumpte Ho:YAG-Laser eine ausgezeichnete Konversionseffizienz von bis zu 60% (differentielle Effizienz) im Dauerstrichbetrieb und bis zu 47% im stabil gepulsten, gütegeschalteten Betrieb mit niedrigen Puls-zu-Puls-Fluktuationen. Pulsenergien bis zu $3,3 \text{ mJ}$ bei 110 ns Pulsdauer können erreicht werden. Mit einer leicht abgeänderten Resonatoranordnung ist es sogar möglich, noch kürzere Pulsdauern im Bereich von 32 ns zu demonstrieren.

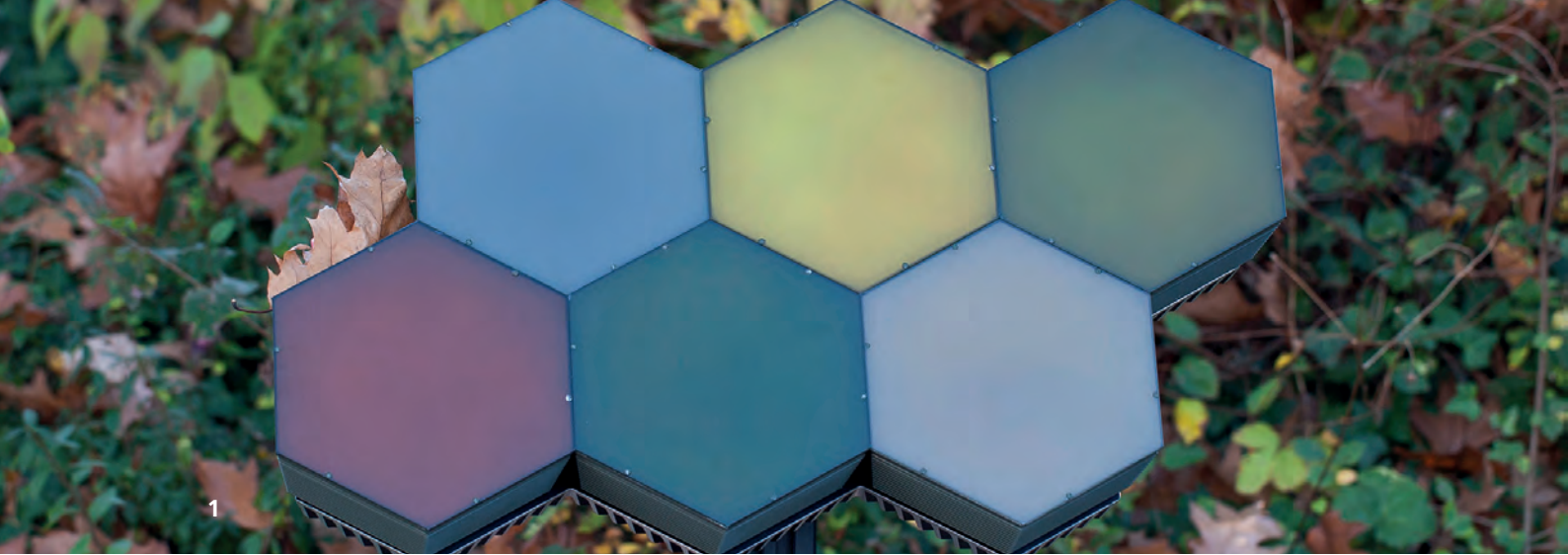
32
ns

Minimal puls duration.
Minimale Pulsdauer.

Das Konzept des resonatorinternen Pumpens, d. h. den Ho-dotierten Kristall im Resonator des Scheibenlasers zu platzieren, ermöglicht sehr kompakte Lasersysteme mit einem Minimum an optischen Elementen. Außerdem

führt dieses Konzept durch die Absorption innerhalb des SDL-Resonators im Mehrfachdurchgang automatisch zu einem sehr gleichmäßigen Pumpprofil innerhalb des Ho:YAG-Kristalls. Sowohl das Dotierniveau als auch die Länge des Ho-Kristalls sind so angepasst, dass der SDL intrinsisch auf ein Absorptionsminimum von Holmium eingeschränkt wird. Auf diese Weise werden keine weiteren Filter zur Wellenlängenselektion benötigt (Abb. 3). Der für dieses Experiment genutzte SDL-Chip hatte eine etwas längere Emissionswellenlänge von $1,98 \mu\text{m}$ und wurde mit einer verbesserten Montagetechnik aufgebaut, wodurch eine Ausgangsleistung von mehr als 16 W im Dauerstrichbetrieb in einem linearen Resonator ermöglicht wurde. Der resonatorintern gepumpte Ho-Laser erreichte eine maximale Ausgangsleistung von $4,4 \text{ W}$ im Dauerstrichbetrieb. In ersten Versuchen, diesen Aufbau gütezuschalten, konnten Pulsenergien von bis zu $0,5 \text{ mJ}$ erreicht werden. Durch zukünftige Optimierungen sind höhere Pulsenergien zu erwarten. Diese gemeinsame Entwicklung von Fraunhofer IAF und LISA laser stellt die erste Demonstration eines SDL-gepumpten Ho-Lasers dar.

Erste Anwendungsversuche bei LISA laser an hartem und weichem Gewebe sowie an transparentem Kunststoff haben das Potenzial der gütegeschalteten Ho-Laser für zukünftige Anwendungen als Laser-Skalpelle gezeigt. Zudem wurden weitere Ansätze identifiziert, welche für einen produktiven Einsatz sowie für eine Produktentwicklung nötig sind.



Self-adaptive LED Modules for Camouflage in the Visible

Michael Kunzer – michael.kunzer@iaf.fraunhofer.de

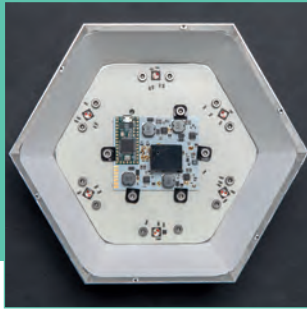
This article summarizes the challenges and development of LED-based adaptive camouflage and signature management for military vehicles. Back-illuminated adaptive LED tiles with external background and built-in color sensors are demonstrated. Through an embedded microcontroller, the system allows closed-loop control of color and brightness of the LED tiles in relation to the background over a wide brightness range and color space typical for outdoor conditions.

1 *Adaptive back-illuminated LED tile in field testing at 3200 lx.*

Adaptive rückseitig beleuchtete LED-Kachel im Feldtest bei 3200 lx Umgebungshelligkeit.

One important factor to protect mobile troops in foreign landscapes and urban environments is vehicle camouflage, which traditionally relies on camo painting and is enhanced with nettings for stationary situations. While camouflage painting can somehow be tailored to a typical foreign landscape, it is often not suitable on the move and in critical urban surroundings where e. g. snipers pose a significant threat. For such missions, adaptive camouflage would be highly desirable. Although adaptive camouflage is widely used in nature, e. g. birds and mammals changing feather or fur color from winter to summer, a technical solution is difficult to achieve. Among others, back-illuminated LED panels are a potential means to achieve quick adaptive signature management and camouflage.

In the last years, LED technology has made considerable progress. Most noticeably, the light output, efficacy, lifetime, operation temperature and coverage of the whole visible spectral range has been improved. However, this was accompanied by a constant decrease of LED cost per package and lumen enforced by a strong solid state lighting (SSL) market growth and international competition. However, not only the LED itself progressed, but LED lighting became smarter as well. Dual-channel white LED modules with color temperature adjustment and colorful RGB modules are available on the market. This goes along with compact LED drivers and a rapid development in light control software and communication protocols. However, most progress in smart lighting is achieved by sensor development and sensor integration.



- Adaptive camouflage
- Signature management in the visible
- High brightness RGBA LED modules
- Color sensing

Selbstadaptive LED-Module für Tarnung im Sichtbaren

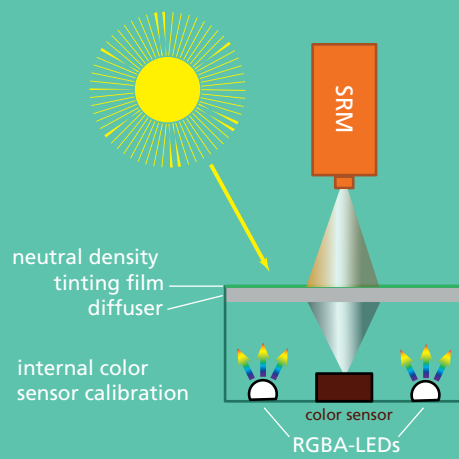
Der vorliegende Artikel beschreibt die Entwicklung LED-basierter Lösungen zur adaptiven Tarnung und Signaturmanagement von militärischen Einsatzfahrzeugen. Hierzu werden rückseitig beleuchtete LED-Kacheln mit externem und eingebautem Farbsensor demonstriert. Durch eine Mikroprozessor-gesteuerte Regelschleife können Farbort und Helligkeit der LED-Kacheln relativ zum Hintergrund über den für Außenanwendungen benötigten hohen Dynamikbereich und einen großen Farbraum eingestellt und nachgeführt werden.

4

*Color channels: RGBA.
Farbkanäle: RGBA.*

Ein wichtiger Faktor beim Schutz von Einsatzkräften in fremder Umgebung und urbanen Räumen stellt die Fahrzeugtarnung dar. Sie beruht bislang auf Tarnanstrichen und wird im stationären Einsatz mit Netzen verbessert. Obwohl sich Tarnanstriche bedingt an die Umgebung anpassen lassen, sind sie in der Bewegung und in städtischen Gebieten, in denen z. B. eine Bedrohung durch Scharfschützen vorliegt, wenig geeignet. Für solche Einsätze wäre eine adaptive Tarnung wünschenswert. Obwohl die adaptive Tarnung in der Natur vielfach eingesetzt wird, z. B. bei Vögeln und Säugetieren durch saisonale Gefieder- bzw. Fellwechsel, ist eine technische Umsetzung anspruchsvoll. Eine Möglichkeit für schnell adaptierendes Tarnen oder Täuschen sind unter anderem rückseitig beleuchtete LED-Kacheln.

In den letzten Jahren war die LED-Technologie von raschem Fortschritt geprägt. Die wichtigsten Verbesserungen lagen im gesteigerten Lichtstrom, der Effizienz, Lebensdauer, Betriebstemperatur und der Abdeckung des sichtbaren Spektralbereichs. Andererseits ging diese Entwicklung mit einem kontinuierlichen Verfall der Kosten pro LED und pro Lumen einher, getrieben durch den internationalen Wettbewerb um Marktanteile bei der LED-Allgemeinbeleuchtung. Neben der LED selbst entwickelte sich auch die Kontrollelektronik deutlich weiter: So sind inzwischen zweikanalige, weiße LED-Module mit Farbtemperaturanpassung und mehrfarbige RGB-Module auf dem Markt verfügbar. Ergänzt wird dies durch kompakte LED-Treiber und einen raschen Fortschritt bei der Steuersoftware und den Kommunikationsprotokollen. Der größte Fortschritt in Richtung »Smart Lighting« ergab sich allerdings durch die Sensor-Entwicklung und -Integration.



2 Schematics of the LED tile with built-in RGBA LEDs, color sensor and diffuser.
Schematische Darstellung der LED-Kachel mit RGBA-LEDs, eingebautem Farbsensor und Diffusor.

Within the Project »AdaptLED2«, Fraunhofer IAF has developed self-adaptive back-illuminated LED tiles in collaboration with Fraunhofer IZM (microelectronics) and IOSB (software and verification). The project was funded by the Wehrtechnische Dienststelle für Schutz-und Sondertechnik (WTD 52).

Each LED tile consists of six individual 10 watt power LEDs containing a blue, green, red and amber chip based on (AlGaIn)N and (AlGaIn)P, respectively. For optimized heat removal, and thus the capability to operate at high ambient temperatures in hot climate, the LEDs were sealed in a ceramic package with glass primary optics, which in turn was mounted directly on a Cu metal core PCB within aluminum housing with side cooling fins (see picture on page 47).

The required RGBA color mixing and homogeneity across the visible area were achieved through a careful optimization of LED position, LED orientation and tile thickness. The optical system consists of several diffractive optical elements, a neutral density tinting film and a polycarbonate diffuser (Fig. 1). A major challenge was to achieve a dark matt outer surface to prevent sun reflections

which would easily expose the tile in the field. Furthermore, lighting conditions in the field range from 10 to 100000 lx and thus require a huge dynamic range and a very high maximum brightness of the LED tile, which by far surpasses the performance of indoor displays.

The system is capable of automatically reading the background color and brightness with a specially developed silicon-based true-color sensor consisting of 19 x 3 hexagonal pixels. The sensor contains dielectric filter layers to closely mimic the day-light response curve of the three types of photoreceptors in the human eye. The same type of true-color sensor is mounted inside the individual LED tiles. All of these sensors have a high dynamic range of 16 bit. The background and tile color sensors were carefully calibrated in a specially equipped photometry lab at Fraunhofer IAF for different levels of LED and sun brightness (Fig. 2). A software running on an embedded microcontroller compares the readings from the background color sensors and the embedded sensors in the LED tile and adjusts the RGBA LED drive currents in a closed-control loop in such a way that both the color and the brightness of the LED tile match those of the background.

3 *Brightness simulation for a tile thickness of 60 mm without diffractive elements.*

Simulation der Leuchtdichteverteilung bei einer Kacheldicke von 60 mm ohne diffraktive Elemente.

Im Rahmen des Projekts »AdaptLED2« hat das Fraunhofer IAF in Zusammenarbeit mit dem IZM (Mikroelektronik) und dem IOSB (Software und Erprobung) selbstadaptive, rückseitig beleuchtete LED-Kacheln entwickelt. Das Projekt wurde von der Wehrtechnischen Dienststelle für Schutz und Sondertechnik (WTD 52) gefördert.

zu erzeugen, die direkte Reflexe der Sonne vermeidet, da diese im Feld sehr auffällig sind. Die Beleuchtungsstärke variiert im Feldeinsatz stark zwischen 10 und 100000 lx. Daher ist eine sehr hohe maximale Leuchtdichte und eine Helligkeitsdynamik erforderlich, welche weit über die Anforderungen gewöhnlicher Bildschirme für Innenräume hinausgeht.

Jede LED-Kachel enthält sechs 10-Watt-Hochleistungs-LEDs mit jeweils einem blauen, grünen, roten und gelben LED-Chip auf der Basis der Materialsysteme (AlGaIn)N und (AlGaIn)P. Zur optimalen Entwärmung, um auch einen Betrieb in heißer Umgebung zu ermöglichen, wurden die LEDs in einem keramischen Gehäuse mit einer Glaslinse montiert. Diese wiederum wurden direkt auf den Kupferkern einer Metallkernplatine in einem Aluminiumgehäuse mit seitlichen Kühlrippen angebracht (siehe Abb. S. 47).

Das System ermittelt die Hintergrundfarbe und -helligkeit mithilfe eines speziell entwickelten Silizium-Farbsensors mit 19 x 3 Pixeln, die mittels dielektrischer Filterschichten die Tageslichtempfindlichkeit der drei Fotorezeptoren des Auges genau nachbilden. Der gleiche Farbsensor ist auch im Innern jeder LED-Kachel montiert. Jeder der Sensoren hat einen Dynamikbereich von 16 Bit pro Farbkanal. Der Hintergrund- und die Kachelsensoren wurden in einem speziell eingerichteten Kalibrierlabor am Fraunhofer IAF für unterschiedliche LED- und Umgebungshelligkeiten kalibriert (siehe Abb. 2). Die auf dem integrierten Mikrokontroller laufende Software vergleicht die Messwerte des Hintergrundensors und des Sensors in der LED-Kachel und steuert die RGBA-LED-Betriebsströme in einer geschlossenen Regelschleife, so dass Farbort und Helligkeit der LED-Kachel der des Hintergrunds entsprechen.

60
W

LED power per tile. Contrast value about 3 times higher than a TFT monitor at 32,000 lx.

LED-Leistung pro Kachel.

Kontrastverhältnis etwa

3-mal höher als bei

TFT-Monitoren bei 32.000 lx

Umgebungshelligkeit.

Um die benötigte RGBA-Farbmischung und eine Gleichverteilung über die Kachelfläche zu erzielen, wurde die Position und Orientierung der LEDs sowie die Kacheldicke sorgfältig optimiert. Das optische System besteht aus mehreren diffraktiven Elementen, einer Neutraldichtefolie und einem schlagfesten Polykarbonatdiffusor (Abb. 1). Eine Herausforderung war es, eine matte äußere Oberfläche



Solar-Blind Avalanche Photodiodes

Thorsten Passow – thorsten.passow@iaf.fraunhofer.de

Fraunhofer IAF has developed solar-blind avalanche photodiodes based on AlGaIn which do not require an additional optical filter to achieve a long-wavelength cut-off at around 250 nm. The devices exhibit an extremely low dark current below the limit of the measurement setup, i. e. <100 fA, for a reverse bias less than 20 V. The avalanche gain starts at reverse bias larger than 30 V and reaches 5500 at a reverse bias of 84 V. These photodiodes may replace current photocathode-based solar-blind detectors, facilitating the use of such detectors e. g. in handheld devices through their reduced form factor.

1 *Air pollution monitoring: Solar-blind avalanche photodiodes detect even small traces of pollutants. Überwachung der Luftqualität. Sonnenlichtunempfindliche Avalanche-Photodioden erfassen schon kleinste Spuren von Schadstoffen.*

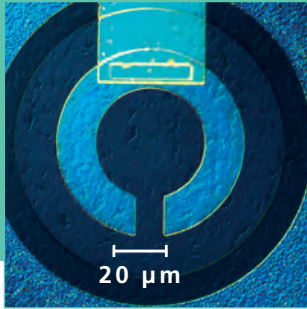
The UV-C spectral region (200–280 nm) is of special interest because the radiation of the sun is completely absorbed in the earth's atmosphere in this wavelength range. Hence, detectors working in this region detect no radiation from the sun – they are »solar-blind«. If a signal has been detected, it must originate from a manmade source. Hence, solar-blind detectors work in a virtually background-free environment. This enables applications that need to receive very low intensity signals, such as missile warning systems, biological agent detection, standoff detection of hazardous substances (such as explosives) or »non-line-of-sight« communication. The UV-C spectral range offers further advantages like discrimination between biological and non-biological agents. A signal in Raman spectroscopy is enhanced by three orders of magnitude compared to the infrared spectral region and is therefore used for stand-off

detection. Very strong light-scattering in the atmosphere can be exploited for »non-line-of-sight« communication.

AlGaIn-based avalanche photodiodes

Today, photocathode-based devices such as multiplier tubes or microchannel plates are used as solar-blind detectors which exhibit a very high sensitivity. However, they need special expensive filters with an extremely high suppression of wavelengths longer than 280 nm to become solar blind. In addition, their function requires vacuum and high supply voltages which makes them elaborate, bulky, and fragile.

Hence, a direct conversion of incident UV-C photons into an electrical signal by using a semiconductor photodiode is desirable. The applications mentioned above require the detection of very low UV photon fluxes.



- Filter-free solar-blind photodiode
- UV-C spectral range
- High avalanche gain in linear mode
- Extremely low dark current

Sonnenlichtunempfindliche Avalanche-Photodioden

Das Fraunhofer IAF hat auf AlGaIn basierende sonnenlichtunempfindliche Avalanche-Photodioden entwickelt, welche keinen zusätzlichen optischen Filter benötigen, um eine langwellige Detektionsgrenze bei 250 nm zu erzielen. Die Bauelemente besitzen einen extrem niedrigen Dunkelstrom unterhalb der Messgrenze des Messaufbaus, d. h. < 100 fA bei einer Sperrspannung von weniger als 20 V. Die Avalanche-Verstärkung beginnt bei einer Sperrspannung von über 30 V und erreicht 5500 bei einer Sperrspannung von 84 V. Diese Photodioden könnten die derzeitigen photokathodenbasierten sonnenlichtunempfindlichen Detektoren ersetzen, was den Einsatz solcher Detektoren, z. B. in Handgeräten, durch ihren reduzierten Formfaktor erleichtert.

5500

*Gain of a solar-blind
AlGaIn APD in linear mode
at a reverse bias of 84 V.*

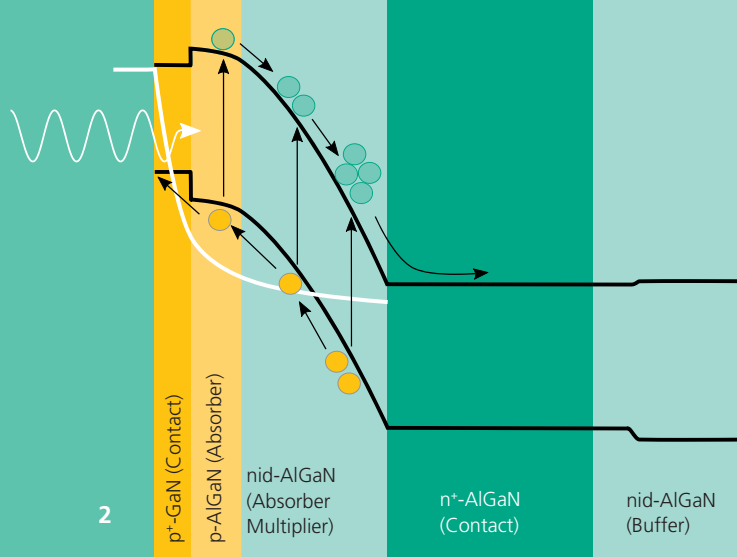
*Verstärkung einer sonnenlicht-
unempfindlichen AlGaIn-APD
im linearen Bereich bei einer
Sperrspannung von 84 V.*

Der UV-C-Spektralbereich (200–280 nm) ist von besonderem Interesse, weil die Strahlung der Sonne in diesem Wellenlängenbereich vollständig in der Erdatmosphäre absorbiert wird. Folglich detektieren in diesem Bereich arbeitende Detektoren keine Strahlung der Sonne – sie sind sonnenlichtunempfindlich. Wenn ein Signal empfangen wurde, muss es demnach von einer künstlichen Quelle stammen. Daher arbeiten sonnenlichtunempfindliche Detektoren in einer praktisch untergrundfreien Umgebung. Dies ermöglicht Anwendungen, bei denen Signale mit sehr niedriger Intensität empfangen werden müssen, wie Raketenwarnsensorik, Detektion biologischer Stoffe, Abstandsdetektion von gefährlichen Substanzen (z. B. Explosivstoffe) oder »Non-Line-of-Sight«-Kommunikation. Der UV-C-Spektralbereich bietet weitere

Vorteile wie die Unterscheidung zwischen biologischen und nicht-biologischen Stoffen und ein um drei Größenordnungen erhöhtes Signal bei der Raman-Spektroskopie im Vergleich zum infraroten Spektralbereich, was für die Detektion aus sicherem Abstand eingesetzt wird. Zudem kann die sehr starke Lichtstreuung in der Atmosphäre für die »Non-Line-of-Sight«-Kommunikation ausgenutzt werden.

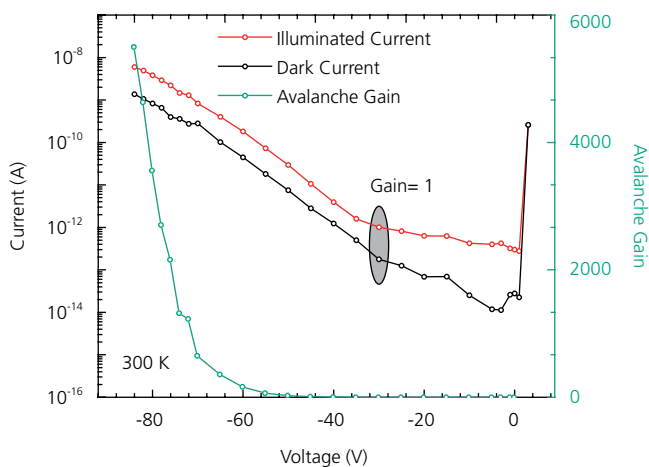
AlGaIn-basierte Avalanche-Photodioden

Derzeit werden auf Photokathoden basierende Geräte wie Photovervielfacher oder Mikrokanalplatten als sonnenlichtunempfindliche Detektoren verwendet, welche eine sehr hohe Empfindlichkeit aufweisen. Sie benötigen jedoch besondere, teure Filter mit einer extrem hohen Unterdrückung von



2 Schematic band-edge diagram illustrating avalanche multiplication in an AlGaIn p-i-n photodiode. Schematische Darstellung der Avalanche-Multiplikation in einer AlGaIn-p-i-n-Photodiode.

Thus, an internal amplification of the signal is necessary. This can be obtained in a semiconductor junction diode by the avalanche multiplication process due to impact ionization of charge carriers which occurs when the internal electric field, caused by an applied external bias voltage, exceeds a certain critical value.



3 I-V characteristics of a solar-blind avalanche photodiode for dark (black) and 246 nm illuminated (red) conditions and calculated avalanche gain (blue) for unity gain at 30 V reverse bias.

I/V-Kennlinien einer sonnenlichtempfindlichen Avalanche-Photodiode unter dunklen (schwarz) und mit 246 nm beleuchteten Bedingungen sowie die berechnete Avalanche-Verstärkung (blau).

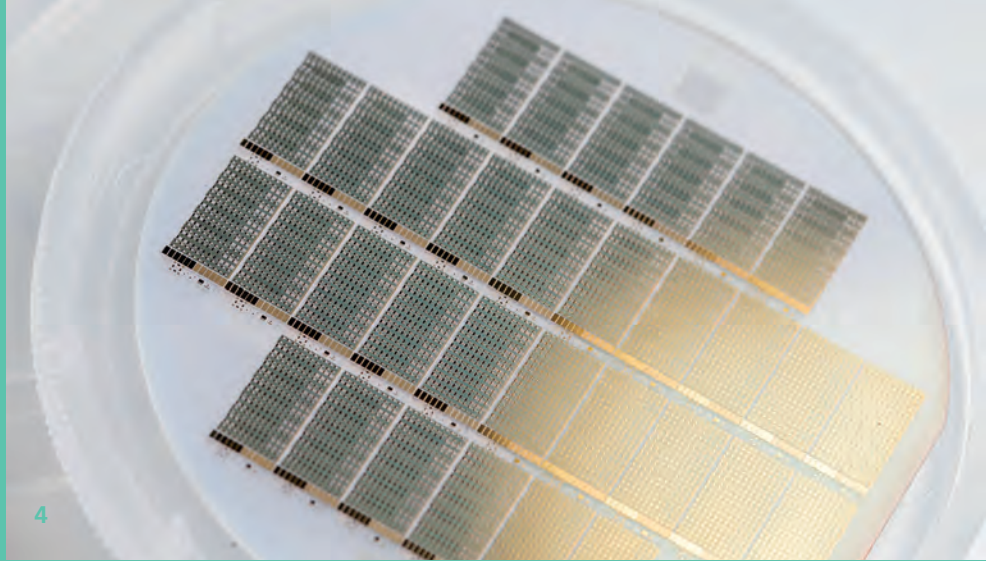
APDs based on the semiconductor material AlGaIn offer clear advantages in this respect. The cut-off wavelength of the sensitive spectral range can be adjusted simply by composition, i. e. the ratio of Al and Ga. It is 365 nm for binary GaN and decreases almost linearly with the

addition of Al, down to 210 nm for pure AlN. Hence, solar-blind APDs for the UV-C spectral range can be realized without an external filter. Furthermore, the large bandgap leads to a very low dark current.

Current research at Fraunhofer IAF

By means of metal organic vapor phase epitaxy, p-i-n AlGaIn layer structures with an Al content of 60 and 65 %, respectively, were grown on sapphire substrates. The epitaxially fabricated layers were subsequently processed into p-i-n photodiodes. Transmission and responsivity measurements reveal a cut-off wavelength of about 250 nm. The peak

responsivity is 58 mA/W, which corresponds to a quantum efficiency of 27 %. The I-V characteristics of the devices were measured in dark and illuminated conditions at room temperature. The dark current is in the 10 to 100 fA range for a reverse bias of less than 20 V. This extremely low value is actually the limit of the measurement setup and not the actual dark current of the device. The current increases exponentially with increasing reverse bias for a reverse bias larger than 30 V in the dark as well as under illumination. This is a clear sign of avalanche gain in both dark and photocurrent already at relatively low reverse bias of just above 30 V. The avalanche gain of the device reaches 5500 in linear mode at a reverse bias of 84 V. The results demonstrate the potential of AlGaIn-based solar-blind APDs for applications which require the detection of very low intensity signals. It is a promising approach to realize smaller, more robust, and cheaper solar-blind detectors. This is particularly attractive for use in portable systems.



4

- 4 *Processed wafer containing AlGaIn-based solar-blind avalanche photodiodes. Prozessierter Wafer mit AlGaIn-basierten sonnenlichtunempfindlichen Avalanche-Photodioden.*

Wellenlängen länger als 280 nm, um sonnenlichtunempfindlich zu sein. Außerdem erfordert ihre Funktion ein Vakuum und eine hohe Betriebsspannung, wodurch sie aufwendig, groß und empfindlich sind.

Daher ist es wünschenswert, einfallende UV-C-Photonen durch eine Halbleiterphotodiode direkt in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Die oben erwähnten Anwendungen erfordern die Detektion sehr geringer UV-Photonenflüsse. Aus diesem Grund ist eine interne Verstärkung des Signals erforderlich. In einer Halbleiterdiode kann dies durch den Avalanche-Multiplikationsprozess mittels Stoßionisation der Ladungsträger erreicht werden, sofern das interne elektrische Feld, das von einer extern angelegten Spannung erzeugt wird, einen bestimmten kritischen Wert überschreitet.

Aktuelle Forschung am Fraunhofer IAF

Durch metallorganische Gasphasenepitaxie konnten p-i-n-AlGaIn-Schichtstrukturen mit einem Al-Gehalt von 60 bzw. 65 % auf Saphir-Substrat abgeschieden werden. Die epitaktisch hergestellten Schichten wurden anschließend zu p-i-n-Photodioden prozessiert. Transmissions- und Responsivitätsmessungen ergaben eine Grenzwellenlänge von etwa 250 nm.

Die maximale Responsivität beträgt 58 mA/W, was einer Quanteneffizienz von 27 % entspricht. Die I/V-Kennlinien der Bauelemente wurden sowohl im Dunkeln als auch beleuchtet und bei Raumtemperatur gemessen. Der Dunkelstrom liegt bei einer Sperrspannung < 20 V im Bereich von 10 bis 100 fA. Dieser extrem niedrige Wert entspricht der Nachweisgrenze des Messaufbaus und ist nicht der tatsächliche Dunkelstrom des Bauelements. Sowohl im Dunkeln als auch unter Beleuchtung steigt der Stromfluss mit steigender Sperrspannung ab einer Spannung von 30 V exponentiell an. Die Avalanche-Verstärkung des Bauelements erreicht 5500 im linearen Regime bei einer Sperrspannung von 84 V. Die Ergebnisse demonstrieren das Potential AlGaIn-basierter sonnenlichtunempfindlicher APDs für Anwendungen, welche die Detektion von Signalen sehr geringer Intensität erfordern. Mit dem vielversprechenden Ansatz können kleinere, robustere und preiswertere sonnenlichtunempfindliche Detektoren realisiert werden, die besonders attraktiv für die Nutzung in tragbaren Systemen sind.

< 100
fA

Dark current of a solar-blind AlGaIn APD for reverse bias < 20 V. Dunkelstrom einer sonnenlichtunempfindlichen AlGaIn-APD bei einer angelegten Sperrspannung von < 20 V.

APDs, die auf dem Halbleitermaterial AlGaIn basieren, bieten in diesem Sinne eindeutige Vorteile: Die Grenzwellenlänge des sensitiven Spektralbereichs kann beispielsweise einfach über das Verhältnis zwischen Al und Ga eingestellt werden. Sie beträgt 365 nm für binäres GaN und verringert sich nahezu linear mit dem Hinzufügen von Al bis auf 210 nm für reines AlN. Daher können sonnenlichtunempfindliche APDs für den UV-C-Spektralbereich erzielt werden, ohne dass ein externer Filter erforderlich ist. Des Weiteren ermöglicht die große Bandlücke einen sehr niedrigen Dunkelstrom.



Planar InGaAs SWIR Photodiodes

Frank Rutz – frank.rutz@iaf.fraunhofer.de

SWIR cameras for night vision applications demand low dark current characteristics. For SWIR photodiodes based on the InGaAs/InP material system, state-of-the-art performance is achieved by utilizing planar process technology. Recently, Fraunhofer IAF has started implementing the planar process technology using a selective zinc diffusion process for the in-house fabricated InGaAs SWIR detectors. In 2017, the dark-current density could be reduced by two orders of magnitude compared to previous SWIR detectors fabricated as mesa-etched photodiodes.

1 *Visible image of the night sky with »night glow«.*
Bild des Nachthimmels mit »night glow«.

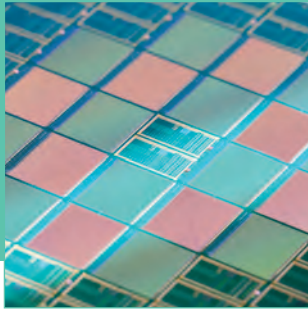
Night vision

Passive night vision systems for the short-wavelength infrared (SWIR, 1–2.5 μm) spectral range benefit from »night glow«, a natural source of light originating from the upper atmosphere (Fig. 1). Moreover, the availability of powerful and yet low-cost laser sources at typical wavelengths around 1.55 μm enables scene illumination or range-gated imaging techniques. SWIR photodetectors can be realized with the InGaAs-on-InP material system, providing a typical cut-off wavelength of 1.7 μm . Thanks to the relatively large band-gap of SWIR semiconductors compared to other infrared-sensitive materials, cooling of the imager can in principle be reduced or even completely avoided. Yet, the night glow intensity as well as the scattering and reflection coefficients are very low. Therefore, SWIR camera systems are required to detect very low photon fluxes. The requirement for

an extremely low dark current of the SWIR detector elements necessitates either cooling or an effective suppression of the dark current by means of an optimized process technology.

InGaAs/InP process technology

We commonly produce photodetectors through a dry-etch mesa process and a dielectric passivation of the mesa sidewalls in order to minimize surface-related dark current. In 2013, Fraunhofer IAF delivered mesa-processed InGaAs SWIR detector arrays to its industrial partner AIM Infrarot-Module GmbH for camera integration. Fig. 3 shows a representative SWIR image of a dark winter landscape in a moonless night, taken with a camera comprising one of our first InGaAs focal plane arrays (FPAs) in mesa process technology. The camera data provided a high uniformity, a narrow responsivity distribution



- Short-wave infrared
- Night vision
- Planar process technology
- Dark current reduction

Planare InGaAs-SWIR-Photodioden

Für Nachtsichtanwendungen werden SWIR-Kameras mit möglichst geringem Dunkelstrom benötigt. Für SWIR-Photodioden auf Basis des InGaAs/InP-Materialsystems stellt die planare Prozesstechnologie den Stand der Technik dar. Vor kurzem hat das Fraunhofer IAF eine planare Prozesstechnologie mittels selektiver Zink-Diffusion in die hauseigene Prozesslinie von InGaAs-SWIR-Detektoren implementiert. Auf diese Weise konnte im Jahr 2017 die Dunkelstromdichte von SWIR-Photodioden gegenüber der früheren Prozessführung in Mesa-Technologie um mehr als zwei Größenordnungen gesenkt werden.

$1 \cdot 10^{-7}$
A/cm²

Dark current density at room temperature for detector elements with 15 μm pitch.

Dunkelstromdichte für Detektorelemente mit 15 μm Rastermaß bei Raumtemperatur.

Nachtsicht

Für passiv betriebene Nachtsichtgeräte im Spektralbereich des kurzwelligen Infrarot (SWIR, 1 – 2,5 μm) kann das Eigenleuchten des Nachthimmels (engl. »night glow«), eine natürliche Lichtquelle aus der oberen Atmosphäre (Abb. 1), ausgenutzt werden. Weiterhin sind leistungsstarke und relativ preisgünstige Laserquellen bei typischen Wellenlängen um 1,55 μm erhältlich, mit denen die zu beobachtende Szene beleuchtet oder entfernungsabhängige Bildgebung (»gated viewing«) ermöglicht werden kann. SWIR-Photodetektoren lassen sich im InGaAs-Materialsystem gitterangepasst auf InP realisieren, was mit einer typischen Grenzwellenlänge von 1,7 μm einhergeht. Dank der relativ großen Bandlückenenergie gegenüber anderen infrarotsensitiven Halbleitermaterialien kann die Kühlung von SWIR-Kameras

deutlich reduziert werden oder gar komplett entfallen. Allerdings sind die typischen Intensitäten des Eigenleuchtens des Nachthimmels wie auch die Streu- und Reflexionskoeffizienten in der Regel sehr klein. Daher müssen die SWIR-Nachtsichtgeräte äußerst geringe Photonenflussdichten nachweisen können. Die damit einhergehenden Anforderungen an extrem geringen Dunkelstrom der SWIR-Detektoren erfordert entweder verstärktes Kühlen oder eine Dunkelstromreduktion durch eine hierfür optimierte Prozesstechnologie.

InGaAs/InP-Prozesstechnologie

Bislang stellt das Fraunhofer IAF Photodetektoren mit einem Mesa-Trockenätzprozess und einer dielektrischen Passivierung der Mesaflanken zur Minimierung der Oberflächenleckströme her. Solche

and a high degree of immunity against blooming. Yet, the dark-current density could only be lowered to around 1 nA/cm², which is required to make use of the faint night glow

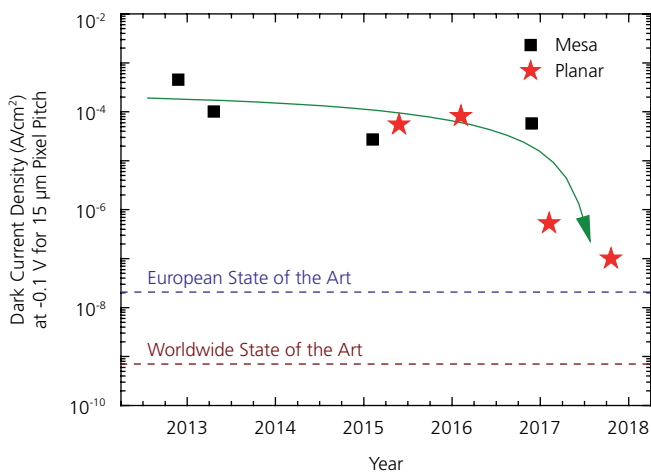
illumination, when the FPA was cooled down to 180 K. With the planar technology, we expect to achieve similar results close to room temperature.

State-of-the-art InGaAs SWIR photodetectors are fabricated using planar technology, however. In contrast to mesa devices, planar-processed FPA pixels

certain density of defect states. Furthermore, compared to mesa sidewalls the unaltered surface of planar-processed diodes is much easier to passivate. All these effects, the avoidance of etch-induced lattice damage, the exposure of the pn junction just at the epitaxial surface, and the more efficient passivation process enable a much lower dark current in planar diodes.

Current status

Two years ago, we started the development of a planar process technology of InGaAs / InP SWIR photodiodes employing selective Zn diffusion. Fig. 2 displays the evolution of the room temperature dark current density with time. Data shown were taken at -0.1 V bias on test devices processed in mesa as well as in planar technology and extrapolated to detector elements with 15 μm pitch. The most recent planar process run yielded more than two orders of magnitude lower dark currents compared to our best mesa-processed InGaAs SWIR photodiodes. Despite the fact that the dark current density of our SWIR detectors is still significantly above the worldwide state of the art (Fig. 2), we have come closer to the European state of the art by a remaining factor of 5 with merely our fourth planar process technology batch.



2 Improvement in the dark current characteristic of InGaAs SWIR photodiode arrays fabricated at Fraunhofer IAF.

Verbesserung der Dunkelstromereigenschaften von am Fraunhofer IAF hergestellten InGaAs-SWIR-Matrixdetektoren.

are laterally structured with a selective Zn diffusion process employing a diffusion mask patterned by photolithography. The Zn atoms diffuse into the top InP layer, thus forming the p-type top contacts as well as the pn junctions at the interface to the n-type grown InP and InGaAs layers. In this way, the pn junction intersects with the boundary of the semiconductor crystal at the epitaxial growth surface instead of intersecting on etched mesa sidewalls, which always exhibits a



3 *SWIR image of a winter landscape in a moonless night, taken with a camera built using one of our first InGaAs focal plane arrays consisting of mesa photo diodes. Photo: Courtesy of AIM Infrarot-Module GmbH. SWIR-Aufnahme einer Winterlandschaft in einer mondlosen Nacht, aufgenommen mit einer Kamera mit einer unserer ersten InGaAs-Bildfeldmatrix in Mesa-Technologie. Foto: Bereitgestellt von AIM Infrarot-Module GmbH.*

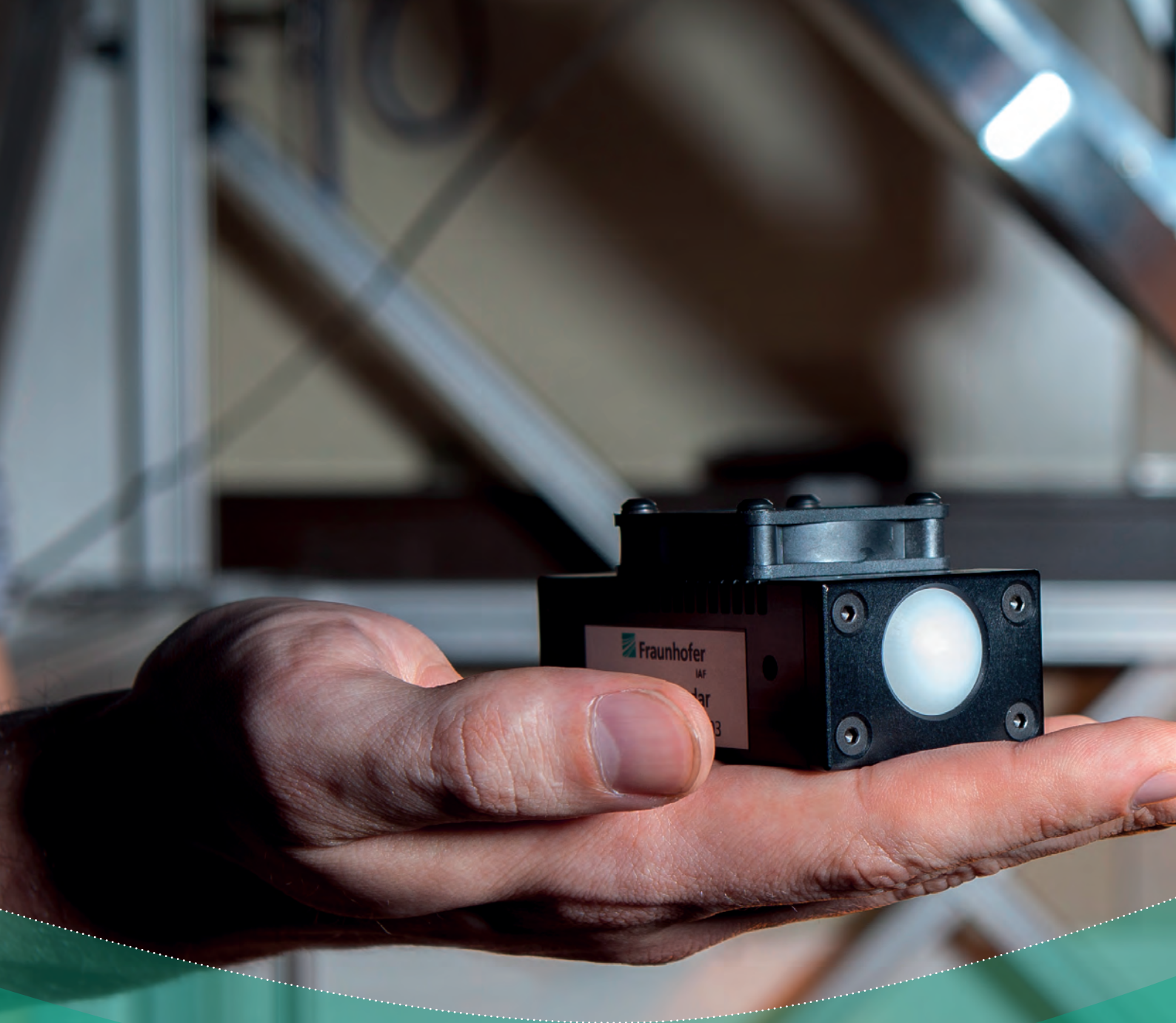
Mesa-prozessierten InGaAs-SWIR-Detektormatrizen wurden vor längerer Zeit bereits zur Kameraintegration an unseren Industriepartner AIM Infrarot-Module GmbH geliefert. Abb. 3 zeigt beispielhaft ein Bild einer dunklen Winterlandschaft in mondloser Nacht, das mit einer Kamera mit einer solchen InGaAs-Bildfeldmatrix, hergestellt in Mesa-Prozesstechnologie, aufgenommen wurde. Die Kamera zeichnet sich dadurch aus, dass ihre Bilder eine hohe Gleichförmigkeit über das gesamte Bildfeld eine schmale Responsivitätsverteilung und eine geringe Anfälligkeit für den »Blooming«-Effekt aufweisen. Zur Nutzung des lichtschwachen Eigenleuchtens des Nachthimmels war es notwendig, die Dunkelstromdichte durch Kühlung auf 180 K auf Werte um 1 nA/cm^2 abzusinken. Mittels planarer Prozesstechnologie sind vergleichbare Ergebnisse bereits nahe Raumtemperatur zu erwarten.

Die planare Prozesstechnologie stellt den Stand der Technik bei InGaAs-SWIR-Photodetektoren dar. Im Gegensatz zu Mesa-prozessierten Bauelementen werden planarprozessierte Detektorelemente mit einem selektiven Zn-Diffusionsprozess unter Zuhilfenahme einer photolithographisch erstellten Diffusionsmaske lateral strukturiert. Die Zn-Atome diffundieren in die obere InP-Schicht und bilden dadurch sowohl den p-Kontakt als auch den pn-Übergang an der Grenzfläche zu den n-artig gewachsenen, nicht-diffundierten InP- und

InGaAs-Schichten. Auf diese Weise stößt der pn-Übergang nicht an der geätzten Mesaflanke an die Oberfläche des Halbleiterkristalls, sondern er endet an einer epitaktisch glatten Oberfläche. Darüber hinaus lässt sich die weitgehend ungeschädigte Oberfläche planarprozessierter Dioden deutlich einfacher passivieren als die Seitenwände geätzter Mesas. Das Vermeiden ätzinduzierter Kristallschädigung, ausschließlich an der epitaktischen Oberfläche freiliegende pn-Übergänge und die wirkungsvollere Passivierung ermöglichen den signifikant geringeren Dunkelstrom in planaren Photodioden.

Aktueller Stand

Vor zwei Jahren starteten wir die Prozessierung von Zn-diffundierten InGaAs/InP-SWIR-Photodioden. Abb. 2 zeigt die zeitliche Entwicklung der Dunkelstromdichte bei Raumtemperatur. Die Werte wurden anhand planarprozessierter Teststrukturen bei einer Spannung von $-0,1 \text{ V}$ gemessen und auf Bildfeldelemente mit $15 \mu\text{m}$ Rastermaß skaliert. Im jüngsten Planarprozesslauf konnte die Dunkelstromdichte um über zwei Größenordnungen gegenüber unseren besten mesaprozessierten InGaAs-SWIR-Photodioden gesenkt werden. Obwohl die Dunkelstromdichte unserer SWIR-Detektoren noch immer deutlich über dem weltweit gültigen Stand der Technik liegt (Abb. 2), haben wir uns dem europäischen Stand bis auf einen Faktor 5 bereits im vierten Planarprozesslauf angenähert.



Systems and Demonstrators

Systeme und Demonstratoren

- 60 **Portable W-band Radar to Support Firefighting Operations**
Tragbares W-Band-Radar zur Unterstützung von Feuerwehreinsätzen
- 64 **Applications for Miniaturized Tunable Infrared Lasers**
Anwendungen miniaturisierter abstimmbarer IR-Laser



Based on the individual requirements of our customers and partners we develop modules and demonstrators on the basis of our devices and circuits. They are primarily intended to highlight the performance of the IAF technologies and enable our customers to evaluate them in their specific application scenario. In the field of high frequency electronics we develop modules and demonstrators for use in communication, radar, and radio astronomy. In optoelectronics we realize customized laser and LED modules as well as system demonstrators. One example is our hand-held demonstrator for real-time spectroscopic sensing to detect e. g. hazardous substances. The same underlying technology also allows us to realize sensing systems for a 100 % control in the chemical and pharmaceutical industry.

Entsprechend den individuellen Anforderungen unserer Partner und Kunden realisieren wir Module und Demonstratoren auf Basis unserer Bauelemente und Schaltungen. Diese dienen zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der am Fraunhofer IAF entwickelten Technologien und ermöglichen unseren Kunden, sie in ihrer jeweiligen spezifischen Anwendung zu evaluieren. In der Mikroelektronik realisieren wir Module und Demonstratoren, die die Einsatzfelder Kommunikation, Radar-Sensorik und Radioastronomie adressieren. Im Bereich Optoelektronik entwickeln wir kundenspezifische Laser- sowie LED-Module und Systemdemonstratoren. Beispiele sind unsere handgehaltenen Echtzeit-Systeme zur Detektion von Gefahrstoffen sowie ein spektroskopisches Messsystem, welches eine 100%-Kontrolle in der chemischen und der pharmazeutischen Industrie ermöglicht.



Portable W-band Radar to Support Firefighting Operations

Christian Zech – christian.zech@iaf.fraunhofer.de

Millimeter-wave systems have attracted increasing interest for industrial applications in recent years. In particular, radar sensors show great potential: They become increasingly compact, lightweight and cost-efficient while providing accuracies on distance measurements down to the sub-millimeter regime. Thus, state-of-the-art radar technologies are ready for use in hand-held sensors which can overcome one of the big challenges in firefighting operations: limited visibility in smoke-filled scenes.

1 *Firefighters operating under reduced visibility conditions.*

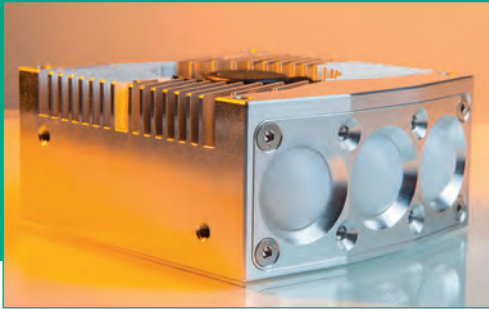
Feuerwehrmänner im Einsatz unter eingeschränkten Sichtbedingungen.

Infrared (IR) cameras are already widely used to provide an image of the surroundings during firefighting operations in situations with dense smoke or limited visibility in dark environments. However, IR vision is significantly inferior to optical cameras, since judging the distance of different objects in the image can be hard or even impossible. Fraunhofer IAF has developed a compact millimeter-wave radar sensor which enhances the depth perception of the firefighter by adding distance information as a third dimension.

The aim of the research project »FeuerWeRR«, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and coordinated by Fraunhofer IPA, is to combine a state-of-the-art IR camera with a compact and lightweight W-band radar system and an inertial measurement unit. While the IR camera can be used to generate a basic visual impression of the surrounding in a smoke-filled or dark environment, the radar

sensor provides accurate distance measurements to allow the firefighter safe navigation in critical situations. In addition, an inertial measurement is used to track the firefighter in situ. The final system is able to create a three-dimensional map of the surrounding using a structure-from-motion algorithm on the IR images, supported by inertial data and radar distance measurements from the scene. In this way, the movement and surrounding of the firefighter can be visualized in the mobile control center.

A radar sensor to improve situational awareness in firefighting operations must not only be robust and light-weight, but must also be able to give the firefighter reliable information on the distance of distinct targets. Two concepts can principally be used for this purpose. The so-called multiple input multiple output (MIMO) radar can be used to calculate not only the distance but also the angular position of different targets, so that they can



- Millimeter-waves
- Radar
- Sensors for harsh environments
- Distance and velocity measurements

Tragbares W-Band-Radar zur Unterstützung von Feuerwehreinsätzen

In den letzten Jahren erfahren Millimeterwellensysteme wachsendes Interesse für industrielle Anwendungen. Großes Potenzial haben insbesondere Radarsensoren, weil sie immer kompakter, leichter und kosteneffizienter werden, sowie Distanzmessungen mit einer Submillimeter-Genauigkeit erlauben. Eine dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechende Radartechnologie ermöglicht somit die Entwicklung gebrauchsfertiger Sensoren in Handgeräten. Radarsensoren können helfen, eine große Herausforderung bei Feuerwehreinsätzen – die eingeschränkte Sicht in verrauchter Umgebung – zu meistern.

94 GHz

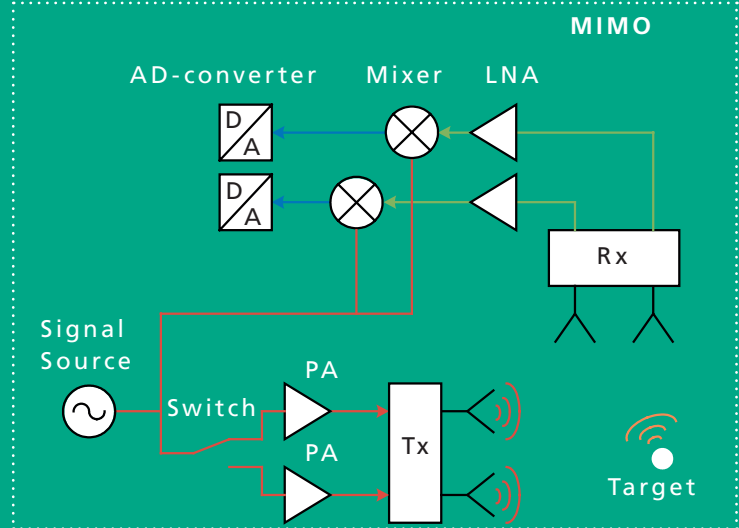
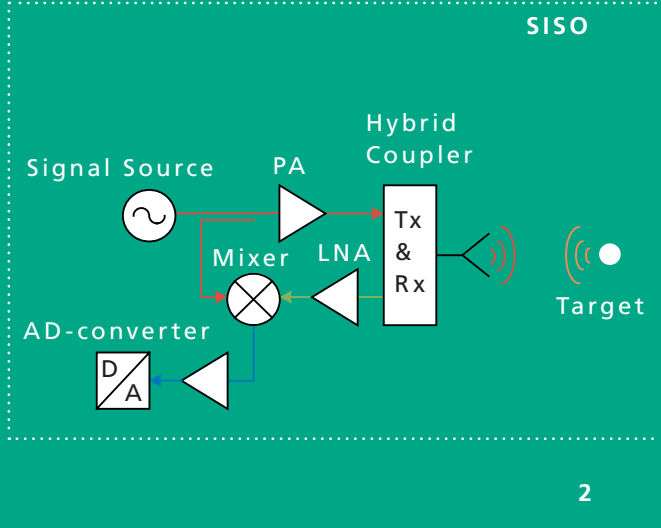
*Transmit frequency.
Sendefrequenz.*

Infrarotkameras (IR-Kameras) finden bereits eine breite Anwendung, um Bilder der Umgebung bei Feuerwehreinsätzen in Situationen mit dichtem Rauch oder eingeschränkter Sicht in einem dunklen Umfeld zu liefern. Jedoch sind IR-Sichtgeräte den optischen Kameras erheblich unterlegen, weil eine Einschätzung der Distanz zu den unterschiedlichen Objekten im Bild schwierig oder nahezu unmöglich ist. Das Fraunhofer IAF hat einen kompakten Millimeterwellen-Radarsensor entwickelt, der die Tiefenwahrnehmung für die Einsatzkräfte durch Hinzufügen der dritten Dimension verbessert.

Das Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten und vom Fraunhofer IPA koordinierten Forschungsprojekts »FeuerWeRR« besteht darin, eine dem Stand der Technik entsprechende Infrarotkamera für Feuerwehreinsätze mit einem kompakten und leichten

W-Band-Radarsystem sowie einem Inertialmesssystem zu kombinieren. Während die IR-Kamera zur Erzeugung des visuellen Basiseindrucks der Umgebung in einem verrauchten oder dunklen Umfeld benutzt werden kann, liefert der Radarsensor genaue Distanzmessungen, um dem Feuerwehrmann eine sichere Orientierung in kritischen Situationen zu ermöglichen. Das endgültige System ist imstande, eine dreidimensionale Karte der Umgebung mit Hilfe des Structure-from-Motion-Algorithmus der IR-Bilder, unterstützt durch die Inertialdaten und Radarmessungen der Szene, zu erstellen. Auf diese Weise kann die Bewegung und Umgebung der Feuerwehrleute in einer mobilen Leitstelle visualisiert werden.

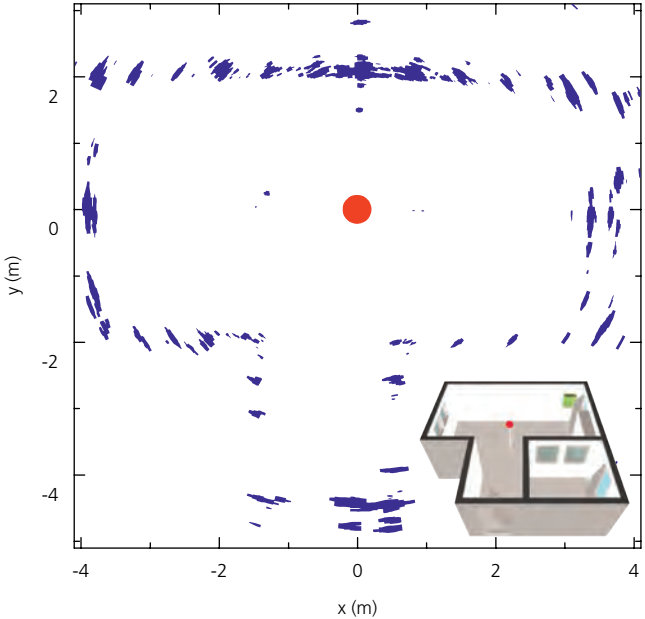
Das Radar zur Verbesserung der Situationserkennung in Feuerwehreinsätzen muss nicht nur robust und leicht sein, es muss auch imstande sein, dem Feuerwehrmann eine



2 Schematic block diagrams of a SISO and a MIMO radar. Blockschaltbilder eines SISO- und eines MIMO-Radars.

be mapped to the features on the IR camera image. In order to realize a MIMO radar the millimeter-wave signal must be generated and split so that it can be transmitted sequentially by two or more antennas. The reflected signals from the target are then received by multiple Rx antennas as sketched in Fig. 2. The distance between the single antennas defines the angular range where targets can be unambiguously identified and depends on the wavelength of the signal. Typically, the antennas must be separated by a distance smaller than the wavelength. Accordingly, the degrees of freedom concerning the design of

analyzing the resulting signals are greatly reduced for a single input single output (SISO) radar. A single antenna acts as transmitter and receiver so that only one mixer is needed in the setup as shown in Fig. 2. Therefore, a SISO radar can be integrated into a single circuit and the design of the antenna is not restricted. On the other hand, since a SISO radar typically illuminates a wide area which can include several targets, it is not possible to determine their angular position. The mapping of the radar range data to features in the IR camera image is thus much more difficult. It is therefore necessary to reduce the spot size, or rather the radiated area, at the target. For firefighting operations, the spot diameter should not be larger than 1 to 2 m in a distance of 10 m, which can be achieved using quasi-optical elliptical lenses designed and fabricated at Fraunhofer IAF.

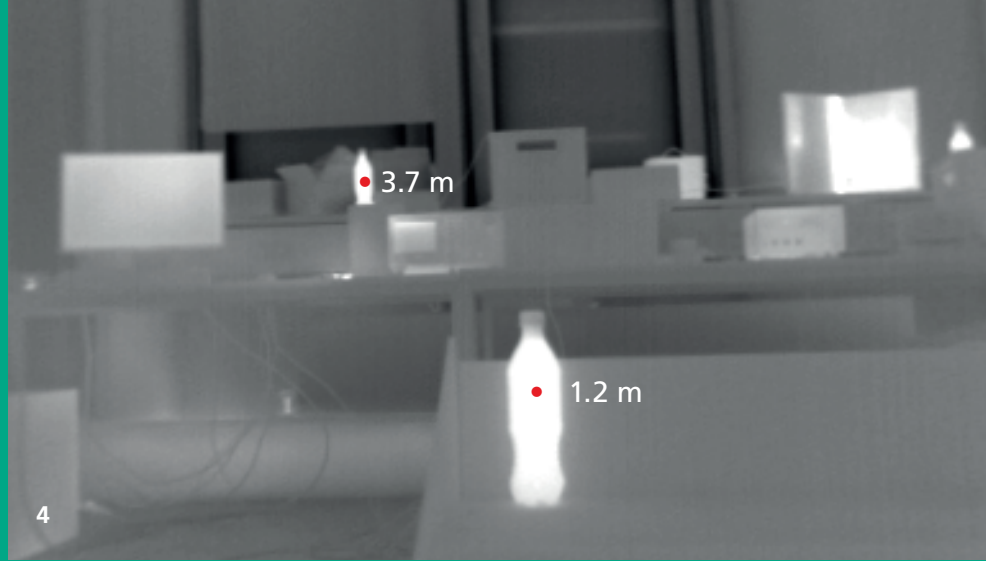


3 Surrounding and location of a person (red spot) determined using a SISO radar in laboratory conditions. Graph: Courtesy of Fraunhofer IPA. Umgebung und Position einer Person (roter Punkt), die unter Laborbedingungen mit einem SISO-Radar bestimmt wurde. Grafik: Bereitgestellt von Fraunhofer IPA.

the antennas are limited in MIMO systems operating at 94 GHz. Furthermore, the hardware complexity increases with the number of antennas due to the increased amount of transmitter and receiver circuits. On the other hand, a MIMO radar can provide the firefighter with information on different targets and their location simultaneously (Fig. 4).

In contrast to MIMO, the design and hardware complexity as well as the difficulty in

To test both radar sensors under realistic conditions, an experiment simulating a firefighter operation was carried out. The hand-held sensor was rotated around 360 degrees as shown in Fig. 3. The corresponding radar responses clearly outline the contour of the room. Similar measurements were also performed inside a training container provided by the firefighting department in Reutlingen. The applicability of the sensor in harsh scenarios including fire, dense smoke and high humidity was successfully demonstrated.



4 IR vision enhanced by radar distance data.

Photo: Courtesy of the Universität Stuttgart, ISS. IR-Kamerabild, welches um Radar-Abstandsdaten ergänzt wurde. Foto: Bereitgestellt von der Universität Stuttgart, ISS.

zuverlässige Information über den Abstand zu bestimmten Zielen zu geben, die er auf dem Bildschirm der IR-Kamera identifiziert. Dazu können prinzipiell zwei Konzepte verwendet werden. Das sogenannte Multiple-Input-Multiple-Output-(MIMO)-Radar kann zur Bestimmung nicht nur der Entfernung sondern auch der Winkelposition unterschiedlicher Objekte und Ziele verwendet werden, so dass die Abstände zu den Objekten in das Bild mit integriert werden können. Um ein MIMO-Radar zu realisieren, muss das Millimeterwellen-Signal generiert und so aufgeteilt werden, dass es sequentiell von zwei oder mehr Antennen gesendet werden kann. Die vom Ziel reflektierten Signale werden dann von mehreren Rx-Antennen empfangen, wie in Abb. 2 dargestellt. Der Abstand zwischen den einzelnen Antennen bestimmt den Winkelbereich, in dem die Ziele eindeutig identifiziert werden können, und hängt von der Wellenlänge des Signals ab. Typischerweise müssen die Antennen in einem Abstand voneinander entfernt sein, der kleiner als die Wellenlänge ist. Demzufolge sind die Freiheitsgrade beim Design von Antennen in MIMO-Systemen für ein bei 94 GHz betriebenes Radar beschränkt. Zudem steigt die Komplexität der Hardware mit der Anzahl der Antennen aufgrund mehrerer Sender- und Empfängerschaltungen. Andererseits kann ein MIMO-Radar dem Feuerwehrmann gleichzeitig Informationen über verschiedene Ziele liefern wie in Abb. 4. dargestellt.

Im Unterschied zu MIMO ist die Komplexität des Designs und der Hardware sowie die

Schwierigkeit bei der Analyse der resultierenden Signale in einem Single-Input-Single-Output-(SISO)-Radar erheblich reduziert. Eine einzige Antenne agiert als Sender und Empfänger, so dass nur ein Mischer in der Schaltung notwendig ist, wie in Abb. 2 gezeigt. Da ein SISO-Radar jedoch typischerweise einen weiten Winkelbereich bestrahlt, der mehrere Ziele einschließen kann, ist es nicht möglich, deren Winkelposition zu bestimmen. Das Einfügen der Radar-Entfernungsdaten in das IR-Kamerabild ist somit viel schwieriger. Daher ist es notwendig, die Messfleckgröße oder vielmehr den bestrahlten Winkelbereich am Ziel so weit wie möglich zu reduzieren. Bei Feuerwehreinsätzen sollte der Radarmessfleck im Abstand von 10 m nicht größer als 1 bis 2 m sein, was mittels quasi-optischer elliptischer Linsen erreicht werden kann, die am Fraunhofer IAF entworfen und hergestellt wurden.

Um beide Radarsensoren im Echteininsatz zu testen, wurde ein Experiment durchgeführt, das den Einsatz eines Feuerwehrmanns simuliert. Der handgehaltene Sensor wurde durch eine Person um 360° gedreht (Abb. 3). Die entsprechenden Radarsignale zeigen deutlich die Kontur des Raumes. Ähnliche Messungen wurden auch innerhalb eines Übungscontainers durchgeführt, welcher von der Feuerwehr Reutlingen zur Verfügung gestellt wurde. Auf diese Weise wurde die Eignung des Sensors für Anwendungen in rauer Umgebung bei eingeschränkter Sicht, wie bei Feuer, dichtem Rauch und hoher Luftfeuchtigkeit, demonstriert.

3 GHz

Bandwidth.
Bandbreite.



Applications for Miniaturized Tunable Infrared Lasers

Marko Härtelt – marko.haertelt@iaf.fraunhofer.de

Contactless and non-destructive sensing plays an important role in many applications from quality monitoring, e.g. in the food or the pharmaceutical industry, to remote detection of potentially dangerous substances. Our external cavity quantum cascade lasers (» μ EC-QCL«) serve as a spectroscopic light source and generate the perfect platform for the development of compact and rugged sensing systems. In the following we show how the μ EC-QCL can be used to monitor the quality of a coating process. Furthermore, a portable hand-held scanner which was developed for remote sensing within the EU-project »CHEQUERS« is presented.

1 *The μ EC-QCL enables real-time IR spectroscopy for quality control of e.g. pharmaceuticals.*

Der μ EC-QCL ermöglicht die echtzeitfähige IR-Spektroskopie zur Qualitätskontrolle, z. B. an Pharmazeutika.

The mid-IR spectral region is of utmost importance for spectroscopy, as the fundamental rotational-vibrational transitions of molecules exhibit distinct absorption lines within this energy range. The highly characteristic absorption patterns allow for selective identification of molecules and functional groups of compounds. Tunable lasers provide several advantages compared to thermal broadband IR sources, such as high spectral power density, unprecedented spectral resolution, and an almost diffraction-limited, collimated output beam. The optimum tunable semiconductor laser sources for mid-IR wavelengths are quantum cascade lasers (QCLs). Compact and rugged devices based on QCLs bear great potential as an enabling technology to transfer mid-IR spectroscopy from laboratory analysis to field use. Apart from a wide spectral

coverage, a high spectral scanning speed is a key requirement for applications where rapidly changing scenarios are addressed, such as monitoring chemical reactions or moving objects. Fraunhofer IPMS and Fraunhofer IAF have realized a miniaturized external cavity QCL source (» μ EC-QCL«) by combining IPMS MOEMS technology with IAF's QCLs and expertise in resonator development. The μ EC-QCL sweeps through the full spectral range of a QCL chip ($> 300 \text{ cm}^{-1}$) in only 1 ms.

In-line process monitoring

An example for in-line process monitoring using our technology is coating of thin foils with adhesive or silicone. Such finishing processes are typically performed at very high speeds and are therefore demanding in terms of measurement speed. To demonstrate the



- Infrared laser spectroscopy
- External cavity quantum cascade lasers
- Contactless sensing
- Hand-held and portable sensing system
- Chemical analysis and quality control

Anwendungen miniaturisierter abstimmbarer IR-Laser

Kontaktlose und zerstörungsfreie Sensorik ist für viele Anwendungsfelder von großer Bedeutung, von der Qualitätsüberwachung, z.B. in der Lebensmittel- oder Pharmaindustrie, bis zur Ferndetektion potenziell gefährlicher Substanzen. Unsere Quantenkaskadenlaser mit externem Resonator (» μ EC-QCL«) dienen als spektroskopische Lichtquelle und bilden die perfekte Plattform für die Entwicklung kompakter und robuster Sensorsysteme. Im Folgenden zeigen wir, wie der μ EC-QCL zur Qualitätsüberwachung eines Beschichtungsprozesses eingesetzt werden kann. Ebenso präsentieren wir den im Rahmen des EU-Projekts »CHEQUERS« entwickelten Handscanner zur berührungslosen Erkennung von Gefahrstoffen.

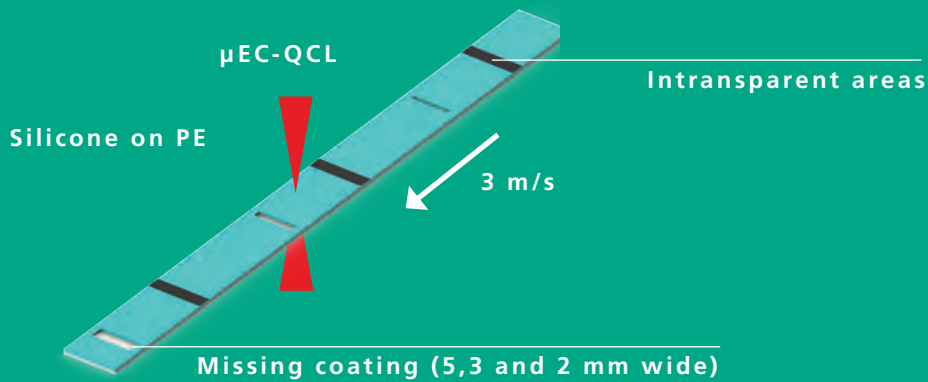
1 ms

Time required to cover the whole tuning range of the μ EC-QCL.

Zeitdauer, um den gesamten Abstimmbereich des μ EC-QCLs abzudecken.

Der mittlere IR-Spektralbereich ist von großer Bedeutung für die Spektroskopie, da die fundamentalen Rotations-Schwingungs-Übergänge von Molekülen zu ausgeprägten Absorptionsbanden in diesem Energiebereich führen. Diese charakteristischen Absorptionsmuster ermöglichen eine Identifizierung der Substanz oder einer funktionellen Gruppe einer Verbindung. Abstimmbare Laser haben im Vergleich zu thermischen Breitband-IR-Quellen viele Vorteile: hohe spektrale Leistungsdichte, beispiellose spektrale Auflösung und einen nahezu beugungsbegrenzten, kollimierten Ausgangsstrahl. Quantenkaskadenlaser sind die optimalen durchstimmbaren Halbleiterlaserquellen im mittleren IR-Wellenlängenbereich. Sie ermöglichen kompakte und robuste Messgeräte und können

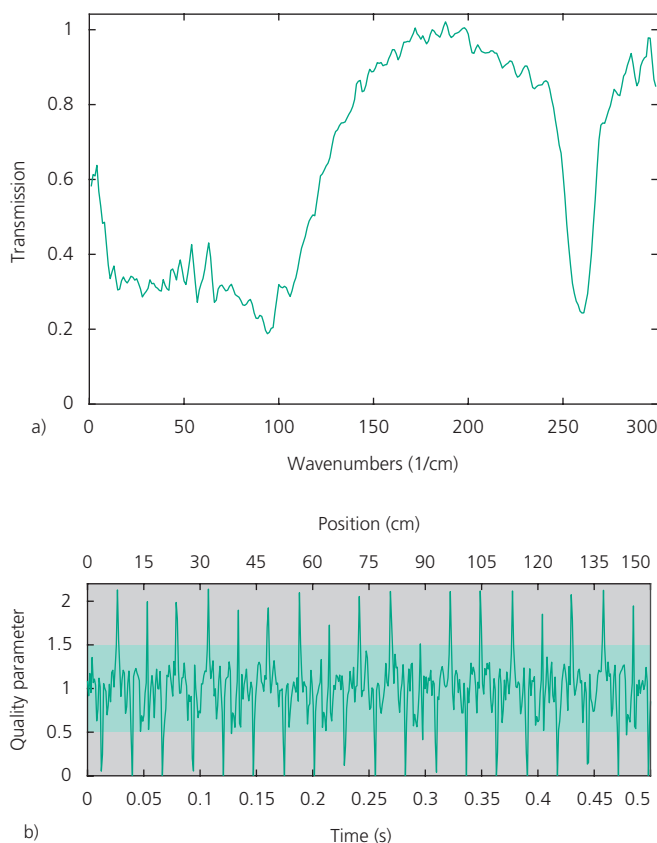
entscheidend dazu beitragen, IR-Spektroskopie von der Laboranalyse in den Feldeinsatz zu bringen. Neben breiter spektraler Abdeckung ist die hohe spektrale Scangeschwindigkeit für Anwendungen wichtig, bei denen sich die Szenarien schnell ändern, z. B. bei der Überwachung einer chemischen Reaktion oder bei sich bewegenden Objekten. Das Fraunhofer IPMS und das Fraunhofer IAF haben eine miniaturisierte QCL-Laserquelle (» μ EC-QCL«) mit einem externem Resonator realisiert, welche die MOEMS-Technologie des Fraunhofer IPMS mit den QCLs des Fraunhofer IAF und dessen Erfahrung im Resonatordesign kombiniert. Der μ EC-QCL überstreicht den gesamten Spektralbereich des QC-Laserchips ($> 300 \text{ cm}^{-1}$) innerhalb von nur 1 ms.



2

- 2 Schematic of a measurement setup for a strip-like sample prepared with two different kinds of defects. Messgeometrie für eine streifenförmige Testprobe mit zwei unterschiedlichen Arten von Defekten.

high-speed sensing capabilities offered by our μ EC-QCL source combined with fast data acquisition, we prepared a silicone coating on a polyethylene foil with intentional defects (i. e. gaps and thickness variations). The foil is measured in motion (3 m/s) in transmission geometry



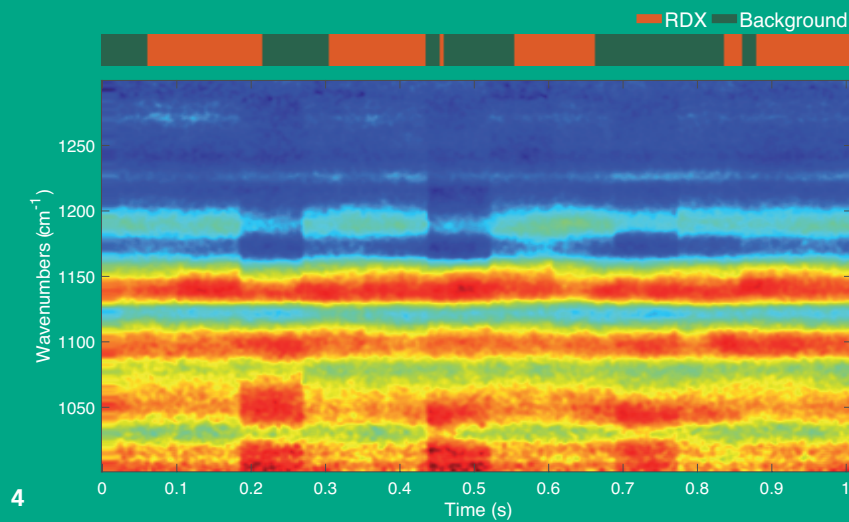
- 3 a) Single sweep spectrum and b) temporal, respective spatial, variation of a quality parameter derived from IR spectra of a silicone coating on a polyethylene foil. a) Einzelspektrum und b) Zeit- bzw. Ortsabhängigkeit des IR-spektroskopischen Qualitätsparameters einer mit Silikon beschichteten Polyethylenfolie.

with the laser beam being focused onto the foil to ensure a high spatial resolution. The single sweep IR spectrum recorded in 1 ms of the silicone coated foil shown in Fig. 3 (a) exhibits several strong silicone related absorption bands in the 1000 to 1300 cm^{-1} range. The most characteristic absorption features in the IR spectrum serve in constructing a quality parameter (Fig. 3 (b)), from which both presence as well as thickness of the coating can be determined from the spectroscopic measurements with a spatial resolution down to 2 mm.

A missing or too thin coating corresponds to an upward deviation of the quality parameter from one, whereas the applied position markers block the laser beam and lead to a downward deviation.

Hand-held sensor

An application which calls for both compact and rapidly tunable lasers in particular are hand-held devices for spectroscopic contactless sensing. They have to account for inevitable slight movements of the hand holding the device. Any meaningful spectrum has to be acquired on a timescale where the scenery can be considered as stationary. The μ EC-QCL proves to be an ideal light source for such a system. Within the EU project »CHEQUERS« a hand-held scanner is developed for the remote detection of explosives or other dangerous substances over distances of some 10 cm to a few meters, intended for use by first responders at incidents or crime scenes. The measurement principle relies on spectrally selective illumination of the target in the 1000 – 1300 cm^{-1} range. The dependence of the intensity of the diffusely scattered light on the illumination wavelength provides spectroscopic information to identify threat compounds via our spectral database which contains a large number of target substances relevant in a security context. The first hand-held demonstrator device, working at a detection distance of 1 m, has successfully passed a series of trial measurements performed jointly by the German BKA and IAF, where it was able to detect many relevant explosives and their precursors (Fig. 4). The technique is by no means restricted to explosives, however, it can be applied for contactless, real-time identification of any solid or liquid substance with a sufficiently characteristic IR spectrum. One relevant example already investigated in our application lab is the identification of pharmaceuticals.



4 *Color-coded evolution of the backscattering spectra measured with the CHEQUERS device, while the beam is rapidly moved over a sample area. Top: Algorithm-based detection of the presence of the explosive RDX at several locations. Farbcodierte Darstellung der Variation der mit dem CHEQUERS-Handscanner aufgenommener Rückstreuungsspektren, während der Messfleck schnell über die Messfläche bewegt wurde. Oben: Auswertalgorithmus-basierter Nachweis des Explosivstoffs RDX an einigen Messpositionen.*

In-line-Prozessüberwachung

Ein Beispiel für eine In-line-Prozesskontrolle basierend auf unserer Technologie ist das Beschichten von Folien mit Kleber oder Silikon. Solche Endbearbeitungen erfolgen typischerweise bei sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten und erfordern daher hohe Messgeschwindigkeiten. Um die Hochgeschwindigkeits-Abtastfähigkeit unserer μ EC-QCL-Quelle zu demonstrieren, welche diese in Verbindung mit einer schneller Datenerfassung ermöglicht, haben wir Poly-ethylenfolie durch Sprühbeschichten mit einer Silikon-schicht versehen. Diese weist Defekte und Dickenvariationen auf. Der Laser wurde auf die Folie fokussiert und deren Transmission bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/s gemessen. Das Einzelspektrum der mit Silikon beschichteten Folie in Abb. 3 (a), aufgenommen in 1 ms, weist im Spektralbereich von 1000–1300 cm^{-1} mehrere Silikon-spezifische Absorptionsbanden auf. Mittels dieser kann ein Qualitätsparameter (Abb. 3 (b)) abgeleitet werden, der es ermöglicht mit einer Ortsauflösung von 2 mm zwischen einer guten, einer fehlerhaften oder einer nicht vorhandenen Beschichtung zu unterscheiden. Eine fehlende oder zu dünne Beschichtung führt zu einer Erhöhung des Parameters, während die Positionsmarkierungen den Laser blockieren und zu einer Erniedrigung führen.

Handgehaltener Sensor

Eine Anwendung, welche insbesondere eine kompakte sowie schnell durchstimmbare Laserquelle voraussetzt, sind tragbare Sensoren für die berührungslose

spektroskopische Detektion. Solche Geräte müssen die unvermeidbaren Bewegungen der Hand ausgleichen. Ein aussagekräftiges Spektrum muss daher auf einer Zeitskala aufgenommen werden, auf welcher die Szene als stationär betrachtet werden kann. Der μ EC-QCL erweist sich als ideale Lichtquelle für ein solches System. Innerhalb des EU-Projektes »CHEQUERS« wird mit Partnern ein tragbarer Sensor für die Ferndetektion von Explosiv- und Gefahrstoffen auf Distanzen von einigen 10 cm bis zu einigen Metern entwickelt. Dieser ist für Einsatzkräfte bei Unfällen oder an Tatorten gedacht. Das Messprinzip basiert auf der spektral selektiven Beleuchtung des Zieles im Wellenlängenbereich von 1000–1300 cm^{-1} . Die Abhängigkeit der Intensität des diffus zurückgestreuten Lichtes von der Beleuchtungswellenlänge dient als Messgröße zur Identifizierung des Gefahrstoffes mittels Abgleich mit unserer Datenbank, welche eine große Anzahl an im Sicherheitsbereich relevanten Zielsubstanzen enthält. Der erste handgehaltene Demonstrator, mit einem festen Arbeitsabstand von 1 m, hat eine Reihe von Testmessungen erfolgreich bestanden, welche durch das Bundeskriminalamt in Zusammenarbeit mit dem IAF durchgeführt wurden. Dabei konnte eine Reihe von Explosivstoffen und ihre Vorprodukte nachgewiesen werden (Abb. 4). Die Technologie ist nicht auf Gefahrstoffe beschränkt: Jeder Feststoff, oder auch Flüssigkeit, mit charakteristischen Absorptionsbanden im IR kann erkannt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Kontrolle von Pharmazeutika.

1 m

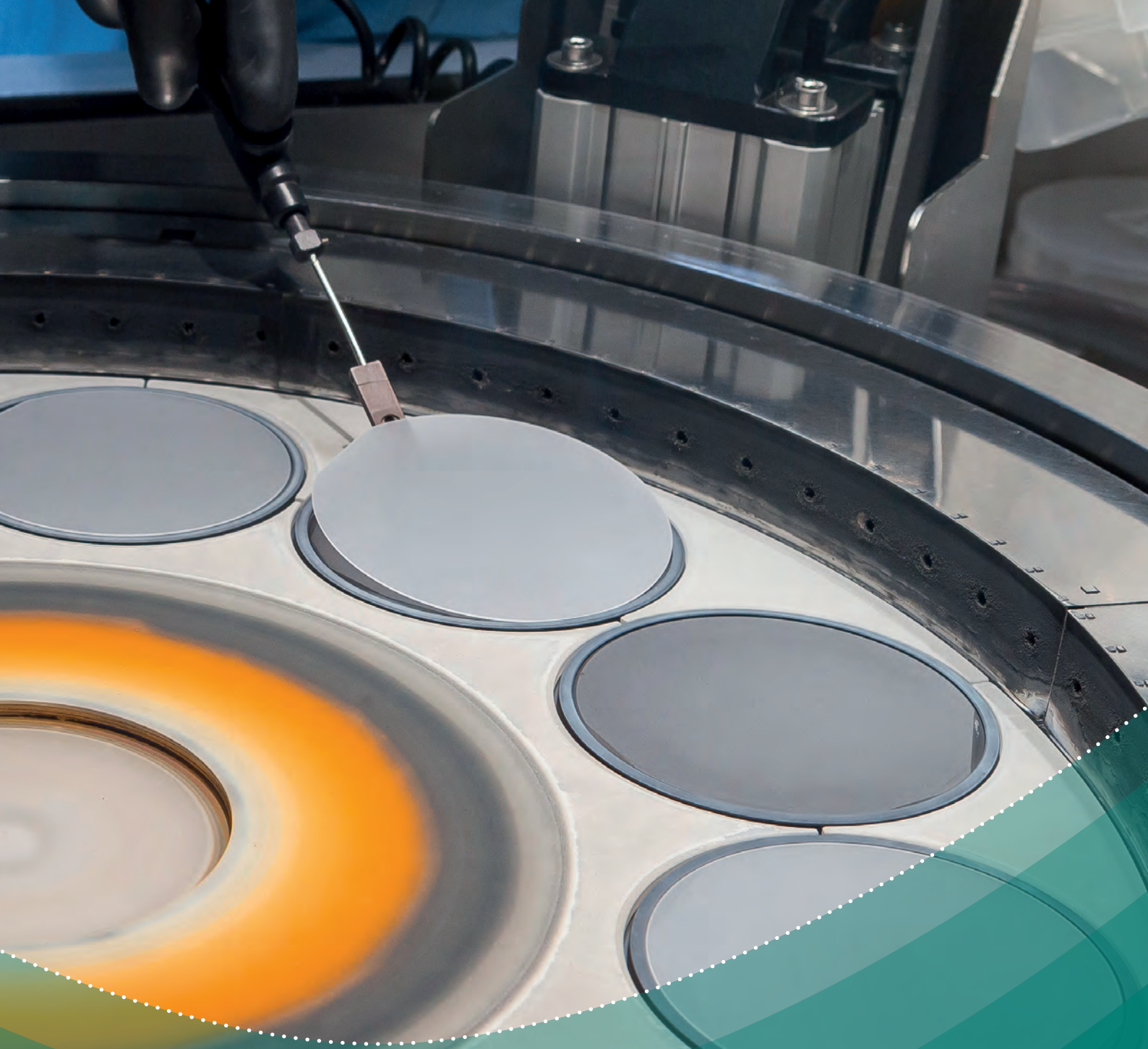
Working distance of the hand-held scanner. Arbeitsabstand des Handscanners.



Materials and Technology Development

Material- und Technologieentwicklung

- 70 **Diamond-based Schottky Diode**
Diamant-basierte Schottky-Diode
- 74 **Graphene Flake Production**
Herstellung von Graphenflocken
- 78 **Hetero-integrated W-band Transmit Module**
Heterointegrierte W-Band-Sendemodule
- 82 **Improvement in the Epitaxy of HEMT Structures**
Verbesserungen bei der Epitaxie von HEMT-Strukturen



In order to realize new device concepts and to improve and extend our current portfolio, we investigate and develop novel materials as well as next generation technologies. One focus of our work is the growth of high purity as well as intentionally doped single-crystalline diamond layers for use in quantum technologies and in future power electronics. In addition, we concentrate on optimizing graphene e. g. for use in energy storage devices and aluminum scandium nitride as an emerging piezoelectric material. With respect to new processing technologies, we currently focus on the combination of different III-V technologies via heterogeneous integration.

Für neue Bauelementkonzepte sowie zur Verbesserung und Erweiterung unseres bestehenden Portfolios arbeiten wir an neuartigen Materialien und Technologien. Ein wesentlicher Schwerpunkt in der Materialentwicklung ist die Herstellung von hochreinen sowie gezielt dotierten einkristallinen Diamantschichten für Anwendungen in den Quantentechnologien oder zukünftige Leistungselektronik-Bauelemente. Weiterhin befassen wir uns mit der Optimierung und Anwendung von Graphen, z. B für die Energiespeicherung sowie Aluminiumscandiumnitrid als neuartigem piezoelektrischem Material. Im Bereich der Technologieentwicklung liegt der Schwerpunkt auf der Heterointegration zur Kombination unterschiedlicher III/V-Technologien.



Diamond-based Schottky Diode

Verena Zürbig – verena.zuerbig@iaf.fraunhofer.de

1 *The special properties of diamond-based Schottky diodes make them an excellent material for use in power converters for solar panels, wind turbines or smart grids.*

Die besonderen Eigenschaften Diamant-basierter Schottky-Dioden machen sie zu einem hervorragenden Material für den Einsatz in Leistungswandlern für Solaranlagen, Windkraftanlagen oder intelligenten Stromnetzen.

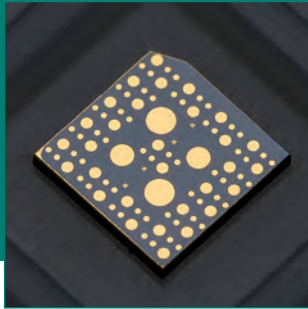
Diamond has been used for more than 50 years, basically for tooling, optical and thermal applications. Diamond, however, is also a representative of the wide bandgap semiconductor materials group. In comparison to commonly used silicon, it offers several attractive characteristics for high voltage power semiconductors that are capable of being operated at elevated temperatures. Among them, the high breakdown voltage assigned to diamond as well as its outstanding thermal conductivity allow designing devices which by far outperform equivalent silicon solutions, and, in particular, enable reaching improved efficiency levels. In benefit of those properties, IAF employs single crystalline diamonds to develop novel high power electronic devices.

As a semiconductor, diamond exhibits several outstanding material properties in comparison to other common semiconductor materials. Diamond shows an excellent electrical insulator behavior, has high carrier mobilities and long carrier lifetimes. These characteristics are beneficial for high-power and high-frequency devices. Electronic applications of diamond are still hampered by the difficulties to achieve efficient n-type doping due to the lack of an efficient donor. On the other hand, well-controlled p-type doping can be obtained by boron doping during growth. Consequently, the first straightforward diamond based power device would be a Schottky diode grown on a heavily p-type doped diamond substrate.

High-power Schottky diodes based on SiC are already available for the 300–1700 V range and have been proven to yield dramatically increased power system efficiency as compared to silicon-based devices due to

the employment of high switching speeds. Furthermore, SiC technology already enables downscaling of power components in size and weight. The ability to achieve a higher current and voltage with fewer components reduces system complexity and costs. Further improvement can be expected by the employment of diamond for Schottky diodes. In particular, higher breakdown voltages, lower leakage currents at high blocking voltages and high operation temperatures can be expected. These new diodes can address demanding applications including solar inverters, industrial switch-mode power supplies, motor controllers in trains, wind-turbine converters and smart grid applications.

At Fraunhofer IAF, vertical Schottky diodes (Fig. 2) were fabricated on highly boron doped ($N_A > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) single crystalline (001) substrates with an area of $3 \times 3 \text{ mm}^2$. The vertical configuration has the advantage of both low series resistances as well as high



- Power electronics
- High breakdown field strength
- Single crystalline diamond
- Schottky diodes

Diamant-basierte Schottky-Diode

Diamant ist seit 50 Jahren Gegenstand der Forschung: im Wesentlichen für die Bestückung von Werkzeugen sowie für optische und thermische Anwendungen. Gleichzeitig ist Diamant ein Vertreter der Gruppe von Halbleitermaterialien mit großer Bandlücke. Seine interessanten Eigenschaften machen Diamant zu einem idealen Material für hochspannungstaugliche Hochleistungsbauelemente, die bei erhöhten Temperaturen eingesetzt werden sollen. Die hohe Durchbruchspannung und herausragende Wärmeleitfähigkeit des Materials Diamant ermöglichen unter anderem die Entwicklung von Bauelementen, welche die Leistung von vergleichbaren Siliziumlösungen bei weitem übertreffen und eine Steigerung der Effizienz bewirken. Das Fraunhofer IAF nutzt diese Eigenschaften und setzt einkristallinen Diamant für die Entwicklung neuartiger elektronischer Hochleistungsbauelemente ein.

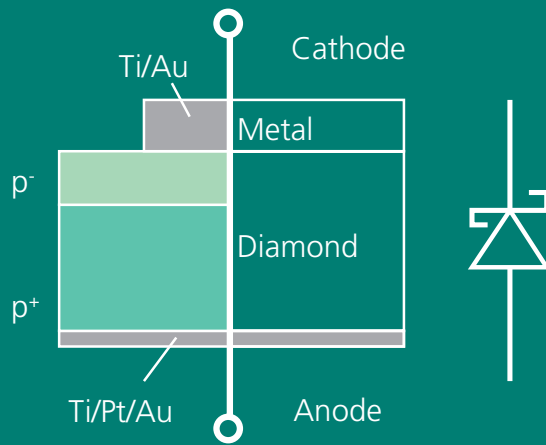
1.7
kV

*Breakdown voltage of the realized Schottky diode.
Durchbruchspannung der realisierten Schottky-Diode.*

Als Halbleiter weist Diamant mehrere im Vergleich zu anderen Halbleitermaterialien herausragenden Materialeigenschaften auf. Diamant zeigt beispielsweise exzellente Isolationseigenschaften, hat eine hohe Ladungsträgerbeweglichkeit und eine hohe Lebensdauer der Ladungsträger. Diese Charakteristika sind vorteilhaft für Hochleistungs- und Hochfrequenzbauelemente. Noch stellt die effiziente n-Dotierung von Diamant aufgrund des Mangels an geeigneten Donatoren eine Herausforderung dar. Durch eine Bor-Dotierung während des Wachstums kann jedoch eine gut kontrollierbare p-Dotierung realisiert werden. Folglich wäre das erste naheliegende Diamant-basierte Hochleistungsbauelement eine Schottky-Diode auf einem hoch p-dotierten Diamantsubstrat. Hochleistungs-Schottky-Dioden auf der Basis von Siliziumcarbid (SiC) sind für den Spannungsbereich von 300–1700 V bereits

verfügbar. Aufgrund ihrer hohen Schaltgeschwindigkeit ermöglichen sie nachweislich wesentlich effizientere Hochspannungswandler als rein Silizium-basierte Lösungen. Zudem ermöglicht bereits die SiC-Technologie eine Reduzierung von Größe und Gewicht der Leistungskomponenten. Der Einsatz des Materials SiC macht es möglich, zugleich weniger Bauelemente zu benutzen und dennoch eine höhere Stromstärke und Spannung zu schalten. Dies verringert sowohl die Systemkomplexität als auch die Kosten. Durch den Einsatz von Diamant für Schottky-Dioden werden weitere Verbesserungen möglich, wie beispielsweise höhere Durchbruchspannungen, niedrigere Leckströme bei hohen Sperrspannungen und hohe Betriebstemperaturen. Die neuen Dioden können für viele Anwendungen interessant sein, unter anderem für Solarwechselrichter, industrielle Schaltnetzteile, Motorsteuerungen in Zügen,

2



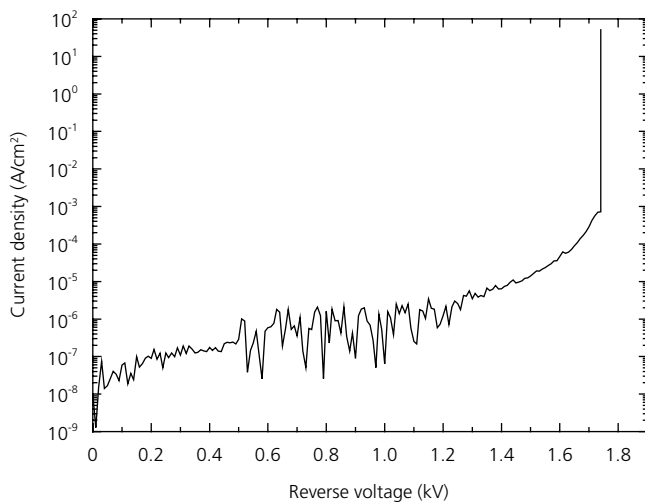
2 Scheme of a vertical diamond-based Schottky diode.

Schema einer vertikalen Diamant-basierten Schottky-Diode.

breakdown voltages. It is characterized by a vertical electrical current through a stack of a highly conductive substrate and a low doped active layer. The high-temperature-high-pressure diamond substrate was polished and wet-chemically cleaned. Diamond films with low boron concentrations ($N_A < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) were grown as active layer by microwave-enhanced chemical vapor deposition. Large area Ohmic contacts were realized by evaporation

of a titanium/gold stack onto the highly doped substrate and by annealing to ensure titanium carbide formation. Before the Schottky electrodes were formed by evaporation of a titanium/gold stack on the diamond epitaxial layer, the surface was terminated by oxygen by using oxygen radicals.

1.7 kV, which in this case corresponds to an electrical field of approximately 1.7 MV/cm. Up to 50 diodes were fabricated on one diamond substrate, showing highly reproducible I-V characteristics. For further improvement, edge terminations like field plates for diamond Schottky diodes can increase the maximum breakdown voltage of the device even further. The forward current density is limited by the doping concentration of the drift region. The Schottky diodes are stable at temperatures up to 450 °C and show a steady rise of the forward current with increasing temperature. This originates from the thermal activation of the boron dopants, which results in a four-fold decrease of the series resistance R_s at 475 K compared to room temperature operation. Consequently, the diodes are preferably operated at elevated temperatures of about 200–250 °C. Other semiconductor materials like Si and SiC generally show increasing serial resistances with temperature, whereas diamond features an increase in conductivity upon increasing temperature. This unique property makes diamond a suitable material especially for high temperature devices.



3 Reverse current-voltage characteristics of a diamond Schottky diode at 300 K.

Strom-Spannungskennlinie einer Diamant-Schottky-Diode in Sperrichtung bei 300 K.

Electrical performance

The Schottky contacts demonstrate very good rectification characteristics with an ideality factor close to 1 in forward direction and reverse current densities smaller than 10^{-6} A/cm^2 up to voltages above 1000 V. The Schottky barrier height was determined to be 1.3 eV and electric breakdown at the surface appeared at a reverse voltage of

In summary, first diamond Schottky diodes with good voltage blocking capabilities have been realized. To increase the breakdown voltage, edge terminations like field plates will be investigated and tested.

Stromrichter in Windkraftanlagen und in intelligenten Stromnetzen. Am Fraunhofer IAF wurden vertikale Schottky-Dioden (Abb. 2) auf mit Bor hochdotierten ($N_A > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) einkristallinen (001) Substraten mit einer Fläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ hergestellt. Die vertikale Anordnung hat gleichermaßen den Vorteil eines niedrigen Serienwiderstandes sowie einer hohen Durchbruchspannung. Bei dieser Anordnung wird der Strom vertikal durch ein hochleitendes poliertes und nasschemisch gereinigtes Diamant-Substrat mit einer darauf aufgewachsenen gering dotierten aktiven Schicht geführt. Diamantfilme mit niedrigen Bor-Konzentrationen ($N_A < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) wurden mithilfe der mikrowellenunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung als aktive Schicht aufgewachsen. Anschließend wurden durch Aufdampfung einer Titan/Gold-Schicht auf das hochdotierte Substrat und darauf folgendes thermisches Ausheizen zur Bildung von Titancarbid großflächige Ohmsche Kontakte realisiert. Vor dem Aufbringen des frontseitigen Titan/Gold-Schottky-Kontaktes wurde die Diamantoberfläche mittels Sauerstoffradikalen mit Sauerstoff terminiert.

1

Ideality factor of the realized Schottky diode.

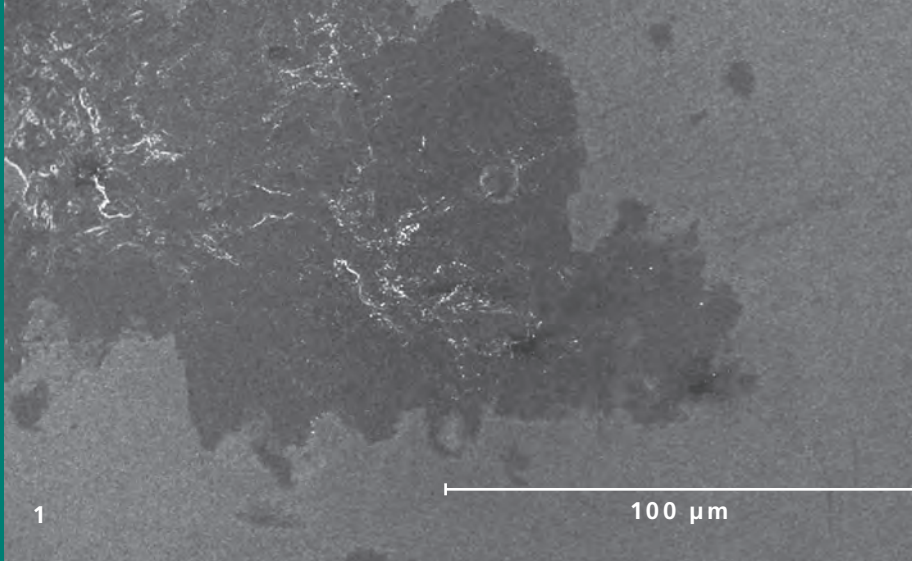
Idealitätsfaktor der realisierten Schottky-Diode.

Elektrische Bauelementeigenschaften

Die Schottky-Kontakte weisen sehr gute Gleichrichtereigenschaften auf, wobei der Idealitätsfaktor in Vorwärtsrichtung bei etwa 1 liegt und die Sperrstrom-Dichte weniger als 10^{-6} A/cm^2 bis zu Rückwärtsspannungen von über 1000 V beträgt. Die Schottky-Barrierehöhe wurde zu 1,3 eV bestimmt und ein elektrischer Durchbruch trat an der Oberfläche bei einer Sperrspannung von 1,7 kV auf,

was hier einer elektrischen Feldstärke von ungefähr 1,7 MV/cm entspricht. Bis zu 50 Dioden wurden auf einem Diamantsubstrat hergestellt, welche sehr reproduzierbar ähnliche I/V-Kennlinien zeigen. Zur weiteren Verbesserung der Durchbruchspannung können z. B. Feldplatten zum Randabschluss auch bei den Diamant-basierten Schottky-Dioden eingesetzt werden. Die Stromdichte in Durchlassrichtung wird durch das Dotierniveau im Drift bestimmt. Die Diamant-basierten Schottky-Dioden sind stabil bis zu Temperaturen von 450 °C und zeigen einen steten Anstieg des Durchlassstroms mit steigender Temperatur. Dies kann auf die thermische Aktivierung des Bor-Akzeptors zurückgeführt werden, was zu einer Reduktion des Serienwiderstands R_s bei 475 K auf ein Viertel des Wertes bei Raumtemperatur führt. Demzufolge eignen sich die Dioden insbesondere für den Betrieb bei erhöhten Temperaturen von etwa 200–250 °C. Gegenüber anderer Halbleitermaterialien wie Si und SiC, welche generell steigende Serienwiderstände mit steigender Temperatur aufweisen, zeigt Diamant einen Anstieg der Leitfähigkeit bei steigender Temperatur – eine einzigartige Eigenschaft, welche Diamant zu einem bevorzugten Material für Bauelemente macht, die bei hohen Temperaturen betrieben werden sollen.

Die ersten Diamant-basierten Schottky-Dioden mit guten Sperreigenschaften wurden somit realisiert. In weiteren Arbeiten wird die Verwendung von Feldplatten als Randabschluss zur weiteren Erhöhung der Sperrspannung untersucht.



Graphene Flake Production

Sarah Roscher – sarah.roscher@iaf.fraunhofer.de

Graphene is a promising new material with great potential due to its unique electrical, mechanical and thermal properties. Industrial application of graphene, however, is hindered by the lack of a suitable, effective production method. Current procedures either fail at scalability or the graphene quality is insufficient for many applications. At Fraunhofer IAF we are working on a production method that fulfills both criteria. Using an electrochemical approach, we are able to produce high quality graphene flakes. Now we are assessing the scalability of our production technique.

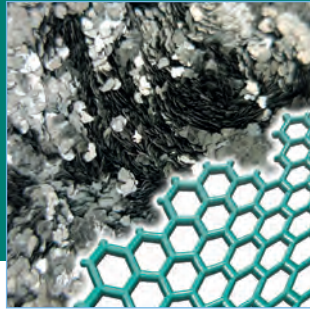
1 *SEM image of a graphene flake on silicon substrate.*
SEM-Aufnahme einer Graphenflocke auf Siliziumsubstrat.

Since the first isolation of graphene, a single layer of carbon atoms of graphite, in 2004, the material has attracted much attention. Not only does it exhibit some remarkable properties, but the combination of them in particular opens a wide range of applications, with more than 25,000 application patents published so far.

As a single layer of carbon atoms, graphene is transparent and flexible while at the same time conductive. This makes it a promising candidate for flexible electronics as well as conductive electrodes for displays and photovoltaics. Another application is the use as an additive in polymers where it increases thermal conductivity or mechanical strength. Furthermore, graphene is chemically inert, which allows electrochemical applications in energy storage devices, specifically in supercapacitors. With its high conductivity it can increase the power density of devices, while the large surface area can enhance the energy density. Improved supercapacitors can build the bridge between batteries and

conventional capacitors – an important issue in today's mobile electronics.

The main challenge in bringing graphene from the lab to industrial applications however, is the large-scale production of graphene. While there are multiple approaches to produce graphene from graphite, these methods are often inefficient, with only a few percent yield, or the produced flakes are still very thick and thus actually still graphite. Additionally, the main problem with methods like liquid phase exfoliation (where the graphite is exfoliated by sheer force) and the oxidation of graphite is that these methods cause tearing of the thin graphene sheets, thus reducing the lateral size of the graphene flakes, and induce permanent defects in the lattice. This lowers the conductivity and subsequently the performance of the device. Therefore, it is not only necessary to develop a method to produce graphene in large quantities, but also with high quality.



- Graphene flakes
- Exfoliation
- Hydrogenation
- Diamond electrodes

Herstellung von Graphenflocken

Graphen ist ein vielversprechendes neues Material mit großem Potenzial aufgrund seiner einzigartigen elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften. Die industrielle Anwendung von Graphen ist jedoch noch eingeschränkt, da bislang eine passende, effektive Produktionsmethode fehlt. Am Fraunhofer IAF arbeiten wir an einer Methode, welche sowohl die Skalierbarkeit als auch die Graphenqualität verbessern soll. Mit einem elektrochemischen Ansatz ist es möglich, Graphenflocken mit hoher Qualität herzustellen. Aktuell evaluieren wir die Skalierbarkeit unseres Herstellungsverfahrens.

100 µm

Graphene flakes with up to 100 µm in lateral size can be produced with our method.

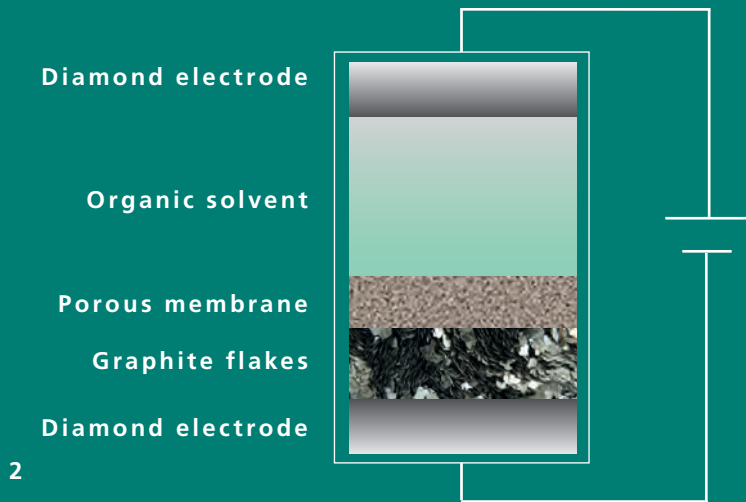
Graphenflocken mit bis zu 100 µm lateraler Ausdehnung können mit unseren Verfahren hergestellt werden.

Seit der erstmaligen Isolierung von Graphen, einer einzelnen Lage von Kohlenstoffatomen, im Jahr 2004 hat das Material viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Es besitzt nicht nur eine Vielzahl von bemerkenswerten Eigenschaften, sondern auch die Kombination dieser, was ein weites Anwendungsfeld eröffnet – mit bisher mehr als 25.000 veröffentlichten Anwendungspatenten.

Als eine einzelne Lage von Kohlenstoffatomen ist Graphen transparent, flexibel und gleichzeitig elektrisch leitfähig. Damit ist es ein vielversprechender Kandidat für flexible Elektronik sowie leitfähige Elektroden für Displays und Photovoltaik. Eine weitere Anwendung ist die Beimischung von Graphen zu Polymeren, wo es die thermische Leitfähigkeit oder mechanische Stabilität verbessert. Weiterhin ist Graphen chemisch inert, was eine elektrochemische Anwendung in Energiespeichern, insbesondere Superkondensatoren, zulässt. Mit seiner guten Leitfähigkeit kann Graphen die Leistungsdichte verbessern,

während seine große Oberfläche die Energiedichte erhöhen kann. Verbesserte Superkondensatoren können die Brücke zwischen Batterien und gewöhnlichen Kondensatoren schlagen – ein wichtiges Thema für den heutigen Anspruch an mobile Elektronik.

Die Hauptherausforderung, Graphen vom Labor hin zu industriellen Anwendungen zu bringen, ist die Produktion von Graphen in großem Maßstab. Denn obwohl es eine Vielzahl von Ansätzen zur Herstellung von Graphen gibt, sind diese Methoden oft nicht effizient: Zum Teil ist die Ausbeute sehr gering oder die hergestellten Graphenflocken sind sehr dick und somit noch graphitisch. Bei Methoden wie der Liquid Phase Exfoliation, bei der das Graphit durch Scherkräfte exfoliiert wird, und bei der Oxidation von Graphit besteht das Problem, dass diese Verfahren die Graphenlagen zerreißen und damit die laterale Ausdehnung der Flocken verkleinern sowie permanente Defekte im Atomgitter erzeugen. Dies verringert die Leitfähigkeit und



2 Schematic of the electrochemical reactor in which graphite is exfoliated to graphene flakes.

Skizze des elektrochemischen Reaktors, in welchem Graphit zu Graphenflöcken exfoliert wird.

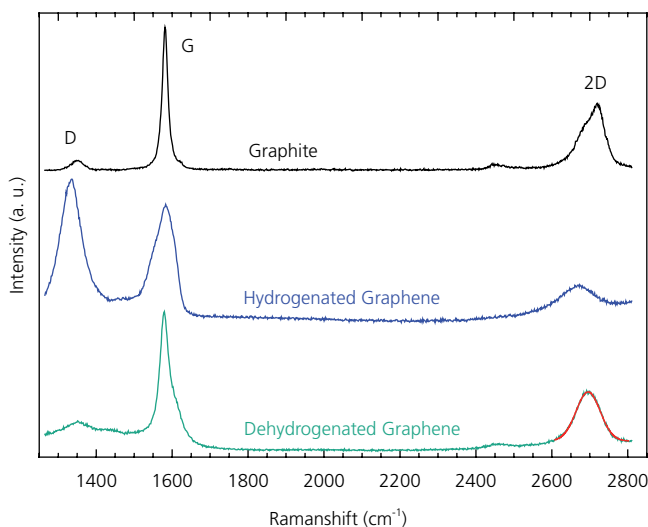
At Fraunhofer IAF we use an electrochemical approach for the production of graphene flakes. Graphite is placed into an organic electrolyte and a high negative voltage is applied. The schematic model of the developed reactor is shown in Fig. 2. For the electrodes we use highly conductive boron-doped diamond, utilizing our in-house know-how in diamond CVD growth. Diamond has the advantage

that it withstands even high applied potentials without degradation, and therefore does not contaminate the graphene flakes. During this electrochemical process the electrolyte's ions intercalate between the graphite layers. Furthermore, the reductive potential causes the hydrogenation of the graphene sheets. The resulting

The number of layers in the flakes can be evaluated from the shape of the 2D mode. In contrast to the asymmetric peak shape of graphite, the peak is completely symmetric after exfoliation and dehydrogenation. This shows that the resulting flakes are actually graphenic, i.e. less than 10 monolayers in thickness. On that account we have developed a 2D Raman peak analysis method to determine this degree of symmetry. About 70 % of the resulting flakes are graphenic, which is a much improved exfoliation efficiency compared to other processes.

Since graphene is not oxidized or otherwise damaged with our production method, the graphite's original lateral crystal size can be preserved, which results in large graphene flakes with up to 100 μm in lateral size. In comparison, graphene flakes produced by liquid phase exfoliation or oxidization methods are only a few μm in size.

We have patented our technique to produce high quality graphene flakes with high efficiency in Germany (102016202202.4) and have filed for PCT application (PCT/EP2016/073451). We are currently working on up-scaling the process in order to assess its applicability for industrial scale production.



3 Raman spectra of the starting material graphite, the hydrogenated graphene after electrochemical treatment, and graphene after hydrogen desorption.

Ramanspektren vom Ausgangsmaterial Graphit, dem hydrierten Graphen nach elektrochemischer Behandlung und nach Wasserstoffdesorption.

increase in layer distance finally leads to the exfoliation of the graphene layers.

Unlike oxidation, the hydrogenation of graphene is fully reversible. The hydrogen can be desorbed by thermal treatment and the pristine graphene lattice is restored. In Raman spectroscopy (Fig. 3) this can be seen in the disappearance of the so called D mode.

damit die Leistung des Bauelements. Daher ist es nicht nur notwendig, eine Methode zu finden, welche die Produktion von Graphen in großen Mengen ermöglicht, sondern auch Graphen von hoher Qualität herstellt.

Am Fraunhofer IAF verwenden wir einen elektrochemischen Ansatz für die Herstellung von Graphenflocken. Dabei wird Graphit in einem organischen Elektrolyt gebracht und ein hohes negatives Potenzial angelegt. Das Schema des entwickelten Reaktors ist in Abb. 2 zu sehen. Als Elektroden verwenden wir hochleitfähigen Bor-dotierten Diamant, den wir mit unserem Wissen von CVD-Diamantwachstum selbst herstellen. Diamant hat den Vorteil, dass er auch hohen angelegten Potenzialen standhält und daher die Graphenflocken frei von Kontaminationen bleiben. Während diesem elektrochemischen Prozess interkalieren die Ionen des Elektrolyts zwischen die Graphitlagen. Zusätzlich führt das reduzierende Potenzial zu einer Hydrierung der Graphenlagen. Die daraus resultierende Zunahme des Lagenabstands führt schließlich zur Exfoliation der Graphenlagen.

Im Gegensatz zur Oxidation ist die Hydrierung des Graphens vollständig reversibel. Durch eine thermische Behandlung kann der Wasserstoff desorbiert werden und das ursprüngliche Graphengitter kann wieder hergestellt werden. In dem Ramanspektrum von Graphen ist dies an dem Verschwinden der sogenannten D-Mode ersichtlich (Abb. 3). Anhand der Form der 2D-Mode kann die Anzahl der Lagen beurteilt werden.

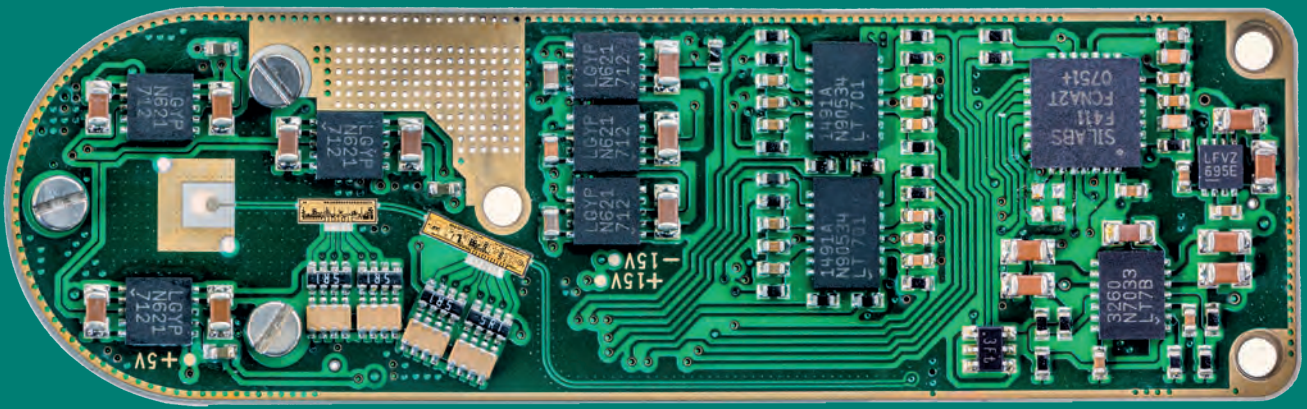
Im Gegensatz zur asymmetrischen Form der Mode von Graphit ist diese nach der Exfoliation und Dehydrierung völlig symmetrisch. Das zeigt, dass die resultierenden Flocken tatsächlich graphenisch sind, d. h. weniger als 10 Monolagen dick. Dabei haben wir eine Analyseverfahren für die 2D-Ramanmode entwickelt, um eben diese Symmetrie zu bestimmen. Etwa 70 % der entstehenden Flocken sind graphenisch, was eine deutlich bessere Exfoliationseffizienz darstellt als bei anderen Methoden.

Da das Graphen im Gegensatz zur Herstellung mit anderen Techniken nicht oxidiert oder anderweitig beschädigt wird, kann die ursprüngliche laterale Ausdehnung der zweidimensionalen Kristallstruktur der Graphitmonolagen erhalten werden, wodurch große Graphenflocken mit bis zu 100 µm lateraler Ausdehnung möglich sind. Im Vergleich dazu haben Graphenflocken, die mit Liquid Phase Exfoliation oder oxidativen Methoden hergestellt werden, nur eine Größe von einigen wenigen µm.

Wir haben unser hocheffizientes Verfahren zur Produktion von qualitativ hochwertigen Graphenflocken in Deutschland patentiert (102016202202.4) und die PCT-Anmeldung eingereicht (PCT/EP2016/073451). Momentan arbeiten wir an der Hochskalierung des Prozesses, um die Anwendbarkeit in industriellem Maßstab weiter voranzutreiben.

70
%

Exfoliation efficiency.
Effizienz der Exfoliation.



1

Hetero-integrated W-band Transmit Module

Axel Tessmann – axel.tessmann@iaf.fraunhofer.de

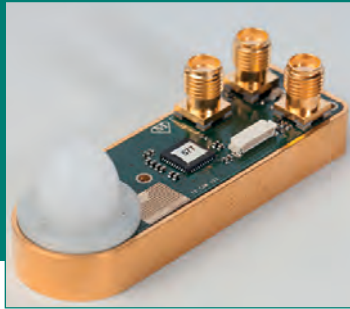
Future high-resolution radar sensors and ultra-broadband communication systems develop their tremendous potential by the simultaneous use of different semiconductor technologies. The smart combination of these technologies enables a continuous improvement of the most important performance indicators such as the achievable operating distance and resolution as well as power consumption or maximum data rate. Particularly the hetero-integration of different semiconductor materials on a single carrier or at wafer level enables the compact and efficient merger of the appropriate technologies and leads to the highest possible functionality.

1 Hetero-integration of a W-band GaN power amplifier and an mHEMT x 12 frequency multiplier MMIC with a silicon-based CMOS control circuitry and a planar monopole antenna on a printed liquid crystal polymer (LCP) circuit board.
Heterointegration eines W-Band GaN-Sendeverstärkers und eines mHEMT Frequenzverzwölfacher-MMICs mit einer Si-basierten CMOS-Ansteuerlektronik und einer planaren Monopolantenne auf einer gemeinsamen Flüssigkristallpolymer (LCP)-Trägerplatine.

Triggered by current hot topics, such as the Internet of things (IoT), autonomous driving, Industry 4.0, digitalization, robotics and unmanned aerial vehicles (drones), the requirements on the complexity and performance of high- and radio-frequency components constantly increases. Recent sensor systems and wireless data links have demonstrated impressive functionality in combination with state-of-the-art technical specifications. As an example, Fraunhofer IAF has demonstrated a line-of-sight radio link with a data rate of 100 Gbit/s at a carrier frequency of 240 GHz by closely cooperating with the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). In a further collaboration with the Fraunhofer FHR, radar images with an amazing resolution of 3.8 mm could be realized by using an operational bandwidth of 40 GHz in the frequency band between 275 and

315 GHz. Due to the multiplicity of available in-house semiconductor technologies with state-of-the-art radio frequency characteristics, Fraunhofer IAF is well equipped to tackle the hetero-integration of high performance III-V components with commercially available silicon technologies (e. g. Si CMOS, SiGe HBT). The major advantages of the III-V-based transistors and MMICs, such as superior cut-off frequencies, noise figures, bandwidths and output powers at high frequencies, can be ideally combined with the complexity and functionality of highly integrated Si circuits.

To demonstrate the capability of hetero-integrated components and subsystems we developed and tested a W-band (75–110 GHz) transmit module. A photograph of the realized 94 GHz transmitter (TX) is shown in Fig. 1. It successfully combines the



- Hetero-integration
- Liquid crystal polymer
- Transmit module
- GaN power amplifier
- mHEMT frequency multiplier

Heterointegrierte W-Band-Sendemodule

Hochauflösende Radarsensoren und ultra-breitbandige Kommunikationssysteme entfalten heutzutage ihr enormes Potenzial durch den gleichzeitigen Einsatz von unterschiedlichen Halbleitertechnologien. Durch deren geschickte Kombination lassen sich wichtige Leistungskenngrößen wie z. B. die erzielbare Reichweite und Auflösung, aber auch der Leistungsverbrauch oder die maximale Datenrate, kontinuierlich verbessern. Insbesondere die Heterointegration von verschiedenen Halbleitermaterialien auf einem gemeinsamen Trägerboard oder bereits auf Chipebene ermöglicht es, die optimalen Technologien kompakt und effizient zusammenzuführen.

3

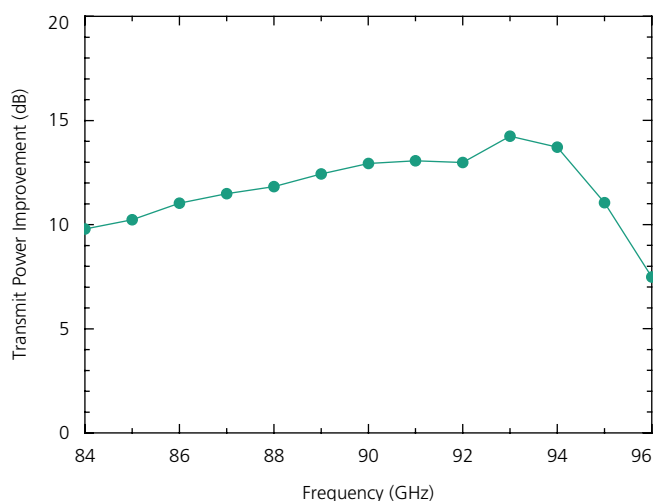
Quantity of the semiconductor technologies (InGaAs, GaN, Si) combined to form the hetero-integrated W-band transmit module. Anzahl der verwendeten Halbleitertechnologien (InGaAs, GaN, Si) die gemeinsam das hetero-integrierte W-Band-Sendemodul bilden.

Bedingt durch die aktuellen Trendthemen wie dem Internet der Dinge, dem autonomen Fahren, Industrie 4.0, aber auch der Digitalisierung und Robotik bis hin zu unbemannten Flugobjekten (Drohnen) steigt der Anspruch an die Komplexität und Leistungsfähigkeit von Hoch- und Höchstfrequenzkomponenten kontinuierlich. Moderne Sensorsysteme und Datenverbindungen bestehen nicht nur durch eine bisher ungeahnte Funktionsvielfalt, sondern auch durch ihre technischen Spezifikationen. So konnte das Fraunhofer IAF in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie bereits vor einigen Jahren eine Richtfunkstrecke mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 100 Gbit/s bei einer Trägerfrequenz von 240 GHz realisieren. In einer weiteren Kooperation mit dem Fraunhofer FHR wurden vor kurzem Radarbilder mit einer fantastischen Auflösung von 3,8 mm

mit einer operationellen Bandbreite von 40 GHz im Frequenzbereich zwischen 275 und 315 GHz aufgenommen.

Aufgrund der Vielzahl an vorhandenen Halbleitertechnologien mit weltweit führenden Hochfrequenz-Kennwerten bietet das Fraunhofer IAF ideale Voraussetzungen für die Heterointegration von hochperformanten III/V-Bauelementen mit kommerziell verfügbaren Silizium-Technologien (z. B. Si-CMOS, SiGe-HBT). Hierbei kann die Überlegenheit der III/V-basierten Transistoren und MMICs hinsichtlich der erreichbaren Grenzfrequenzen, Rauschzahl, Bandbreite und Ausgangsleistung bei entsprechend hohen Frequenzen in idealer Weise mit der Komplexität und Funktionalität von höchstintegrierten Silizium-Schaltkreisen zusammengeführt werden.

three semiconductor technologies metamorphic indium gallium arsenide HEMT (mHEMT), gallium nitride HEMT (GaN), and silicon complementary metal oxide semiconductor (CMOS). An mHEMT-based x 12 frequency multiplier MMIC converts a 7.8 GHz input

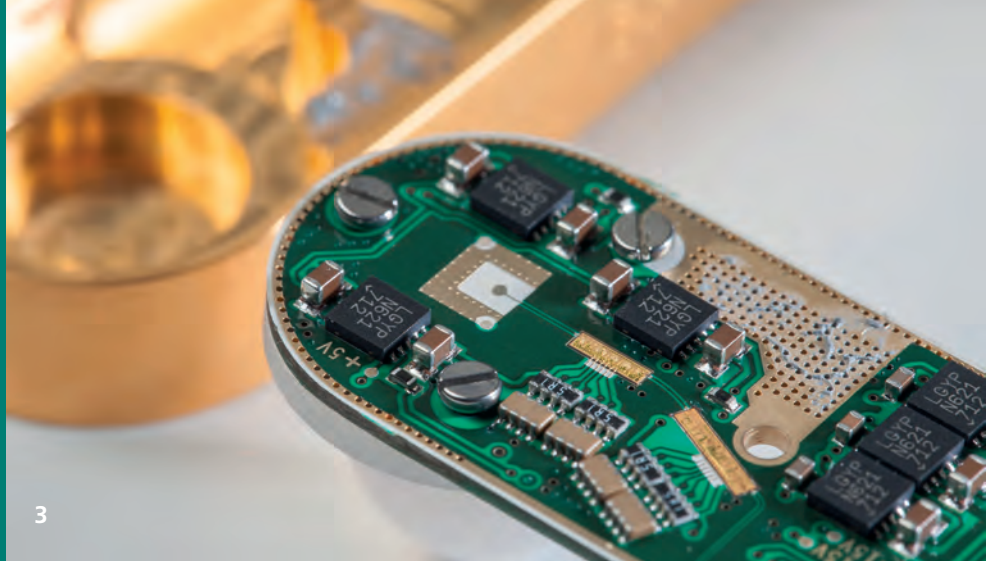


2 *Transmit power improvement of the hetero-integrated W-band transmit module.*
Verbesserung der Sendeleistung des heterointegrierten W-Band-Moduls.

signal with high spectral purity into the frequency band between 85 – 95 GHz. Subsequently, the generated millimeterwave signal is amplified by a GaN-based medium power amplifier (MPA) before it is emitted by a broadband monopole antenna. The two radio frequency MMICs were controlled by an integrated CMOS circuitry, which also includes a protection against electrostatic discharge (ESD) and reverse voltage. The employed semiconductor components and the planar antenna were mounted on a compact four layer hybrid printed circuit board (PCB). To enable low-loss radio frequency (RF) transmission lines together with an ultra-broadband monopole antenna, the top layer of the printed circuit board was realized by an only 50 μm thick

liquid crystal polymer (LCP). The bottom layer of the hybrid PCB was fabricated by using a conventional composite material (FR4) which was manufactured with a thickness of 410 μm to ensure good mechanical stability of the overall transmit channel. The external programming of the electronics can be carried out by an integrated serial interface on the bottom side of the PCB. To focus the radiated electromagnetic wave, a high-density polyethylene (HDPE) lens was fabricated and mounted on the printed circuit board.

Finally, the RF performance of the hetero-integrated 94 GHz transmit channel was characterized on a 1 m long optical bench. As a reference, we first measured the characteristics of an existing mHEMT transmitter. The transmit power of the hetero-integrated W-band transmit module could be increased by a factor of 20 (13 dB) if compared to the conventional TX module, as shown in Fig. 2. In a next step, we will add the successfully demonstrated co-integration on component- and circuit level by hetero-integrating the different semiconductor technologies on a single chip. The combination of the particular advantages of the chosen semiconductor technologies leads to a significant increase in functionality and performance of future MMIC generations, while their aspect ratio can be considerably reduced.



3

3 Detailed view of the hetero-integrated W-band transmit module.

Detailansicht des heterointegrierten W-Band-Sendemoduls.

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von zu Subsystemen heterointegrierten Komponenten wurde am Fraunhofer IAF ein kompaktes W-Band (75–110 GHz) Sendemodul realisiert und getestet. Der in Abb. 1 dargestellte 94 GHz-Transmitter vereint die drei unterschiedlichen Technologien der metamorphen Indium-Galliumarsenid-HEMTs (mHEMT), Galliumnitrid-HEMTs (GaN) und Silizium Metalloxid-Halbleiter (CMOS). Dabei wird ein hochreines Eingangssignal um 7,8 GHz zunächst mit einem mHEMT-basierten Frequenzverzwölfacher-MMIC in den Frequenzbereich zwischen 85 und 95 GHz umgesetzt. Das erzeugte Millimeterwellensignal wird anschließend durch einen GaN-basierten Leistungsverstärker mittlerer Ausgangsleistung (MPA) weiter verstärkt, bevor es über eine breitbandige Monopol-Antenne abgestrahlt wird. Die Ansteuerung der beiden HF-Schaltkreise erfolgt über eine integrierte CMOS-Elektronik, welche weiterhin einen Schutz vor elektrostatischer Entladung (ESD) und Verpolung beinhaltet. Alle verwendeten Halbleiterkomponenten wurden zusammen mit der Planarantenne auf einer kompakten, vierlagigen Hybridleiterplatte (PCB) montiert. Für die Realisierung von verlustarmen Hochfrequenz-Leiterbahnen sowie zur Integration der breitbandigen Monopol-Antenne wurde die obere Lage der Leiterplatte in einer lediglich 50 µm dicken Flüssigkristalpolymerschicht (LCP) ausgeführt. Die zweite Lage des Hybrid-PCBs besteht

aus dem konventionellen Verbundwerkstoff FR4, welcher zur mechanischen Stabilisierung des Sendemoduls mit einer Schichtdicke von 410 µm realisiert wurde. Die externe Programmierung der Ansteuerelektronik erfolgt über eine integrierte serielle Schnittstelle auf der Platinenunterseite. Zur besseren Bündelung der abgestrahlten elektromagnetischen Welle wurde eine Linse aus hochdichtem Polyethylen (HDPE) entworfen und ebenfalls auf der unteren Platinenlage befestigt.

Die Bestimmung der Hochfrequenz-Eigenschaften des heterointegrierten 94 GHz Sendemoduls erfolgte auf einer 1 m langen optischen Schiene. Als Referenz wurden zunächst die Leistungsdaten eines bestehenden mHEMT-Sendemoduls aufgenommen. Wie in Abb. 2 dargestellt, weist der heterointegrierte W-Band-Transmitter im Mittel eine um den Faktor 20 (13 dB) höhere Ausgangsleistung als der konventionelle TX-Schaltkreis auf. Im nächsten Schritt soll die erfolgreich demonstrierte Kointegration auf Komponenten- und Schaltungsebene durch die Heterointegration von mehreren Halbleitermaterialien auf einem gemeinsamen Chip abgelöst werden. Die verlustarme Kombination der einzelnen Halbleitertechnologien mit ihren jeweiligen technischen Vorzügen führt zu einem erheblich gesteigerten Funktions- und Leistungsumfang zukünftiger MMIC-Generationen bei gleichzeitig deutlich reduziertem Formfaktor.

20

Multiplier by which the transmit power of the W-band transmit module could be improved.

Faktor, um den die Ausgangsleistung des W-Band-Sendemoduls verbessert werden konnte.



Improvement in the Epitaxy of HEMT Structures

Stefano Leone – stefano.leone@iaf.fraunhofer.de

Uniformity, reproducibility and high yields are key parameters to be optimized in order to meet our customers' specifications. In our metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) reactor we have optimized the hardware, tuned the epitaxial growth process, and managed to deposit reproducibly uniform AlGa_N/Ga_N epitaxial layers for high electron mobility transistors (HEMT) which are required for high speed mobile communication and radars operating at high frequencies.

- 1 Example of communication networks in smart cities. High frequency electronics, based on GaN high electron mobility transistors, will be increasingly necessary for high speed mobile communication.**

Beispiel der Netzwerkkommunikation in Smart Cities. Hochfrequenzgeräte, die auf GaN-Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit basieren, werden für die Hochgeschwindigkeits-Mobilkommunikation immer notwendiger.

Nowadays, one of the main challenges in the field of semiconductor materials is to keep pace with the latest research findings while at the same time accomplishing the demand for mass production at an industrial level. The characteristics of each transistor manufactured on an epitaxial wafer must be as similar as possible: not only those on the same wafer (uniformity), but also those from wafer to wafer, run after run, day after day (reproducibility).

HEMTs that are based on AlGa_N alloys are becoming a key technology in the field of mobile communication. They have already been adopted by several semiconductor industries and can be found in several applications around us in everyday life, for example in all those requiring high speed mobile communication.

Metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) is used to deposit AlGa_N epitaxial layers on silicon carbide (SiC) wafers. Afterwards, we manufacture HEMTs for RF applications on such wafers in our technology department. This epitaxial process is performed within an MOCVD reactor at high temperatures (exceeding 1200 °C) and low pressure, by flowing precursors of gallium (TMGa) and aluminium (TMAI) with ammonia transported by a high flow of hydrogen. Up to 11 wafers with 100 mm in diameter can be loaded in the reactor. The reactor's hardware is specifically tailored to deposit the epitaxial layers.

One of the main challenges is to grow the epitaxial layers uniformly on each wafer. In order to achieve our targets, we have optimized the gas flow distribution in the



- **Uniformity and reproducibility**
- **III-Nitride epitaxy**
- **AlGaIn/GaN HEMT for high frequency devices**
- **Process adaptability**

Verbesserungen bei der Epitaxie von HEMT-Strukturen

Uniformität, Reproduzierbarkeit und Ausbeute sind entscheidende Parameter für unsere Kunden, wenn wir für sie Epitaxieprozesse entwickeln. Im Bereich der metallorganischen Gasphasenabscheidung (MOCVD) konnten wir durch Verbesserung des Reaktoraufbaus und Optimierung des Epitaxieprozesses reproduzierbar gleichförmige AlGaIn/GaN-Schichtstrukturen für Transistoren mit hoher Elektronenbeweglichkeit (HEMTs) herstellen, wie sie für die Hochgeschwindigkeitskommunikation und Radaranwendungen bei hohen Frequenzen benötigt werden.

< 2
%

Standard deviation of the sheet resistance on a wafer.

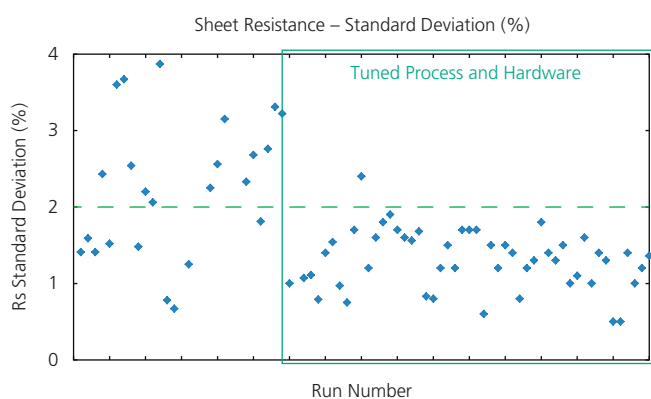
Standardabweichung der Schichtdicke auf einem Wafer.

Eine der derzeit größten Herausforderungen im Bereich Halbleitermaterialien ist es, gleichzeitig mit den neuesten Forschungsergebnissen Schritt zu halten und die Fähigkeit zur zuverlässigen, industrienahen Fertigung zu schaffen. Die Eigenschaften der einzelnen Transistoren, die auf epitaxierten Wafern hergestellt werden, müssen einander so ähnlich wie möglich sein; das gilt nicht nur für Transistoren auf demselben Wafer (Uniformität), sondern auch für Bauelemente auf unterschiedlichen Wafern, die in separaten Epitaxieläufen an verschiedenen Tagen hergestellt worden sind (Reproduzierbarkeit).

Auf AlGaIn-Heterostrukturen basierende HEMTs entwickeln sich zu einer Schlüsseltechnologie im Bereich der mobilen Kommunikation. Sie werden bereits von mehreren

Halbleiterfirmen in Serien gefertigt und sind auch im täglichen Leben schon in vielen Anwendungen zu finden, insbesondere dort, wo schnelle mobile Kommunikation benötigt wird.

Am Fraunhofer IAF werden durch metallorganische Gasphasenabscheidung (MOCVD) AlGaIn-Epitaxieschichten auf Siliziumkarbid (SiC)-Wafer aufgebracht. Danach werden auf diesen Wafern HEMTs für HF-Anwendungen in unserer Technologieabteilung hergestellt. Die Epitaxie wird in einem MOCVD-Reaktor bei hohen Temperaturen (über 1200 °C) und niedrigem Druck durchgeführt. Metallorganische Gallium- und Aluminium-Verbindungen (TMGa bzw. TMAI) werden dabei als Ausgangsstoffe für die Gruppe III-Elemente gemeinsam mit Ammoniak als Stickstoffquelle



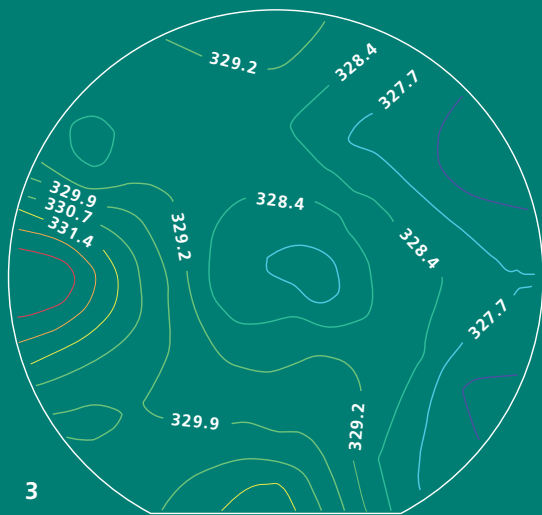
2 Plot indicating the uniformity of sheet resistance measured on AlGaIn/GaN epitaxial layers deposited on 100 mm SiC wafers. The data within the green box are for the process with optimized conditions and hardware modifications. Run-zu-Run-Variation des Schichtwiderstands, der auf AlGaIn/GaN-Epitaxieschichten gemessen wird, die auf 100 mm SiC-Wafern abgelesen sind. Die Daten innerhalb der grünen Box sind für optimierte Prozessbedingungen und entsprechende Hardwareänderungen.

reaction chamber. Due to the different reactivity as well as the different kinetic and thermodynamic characteristics of each precursor, we have developed an optimum dynamic gas flow specific to the epitaxial structure and substrate. The resulting sheet resistance of the HEMT, which is strongly correlated with the

thickness and alloy composition of the barrier and cap layers, has a standard deviation below 2 % on wafer, as shown in Fig. 2. This value lies within typical specifications offered by industrial suppliers of epitaxial layers. The other challenge is the reproducibility from one epitaxy run to another. This can be accomplished by tuning the hardware of the MOCVD reactor. Due to the usage of very high temperatures in this process, the strain on the wafer during growth and variation in the status of the system run after run can severely affect the outcome of the epitaxial growth. Therefore, we have developed a baking process which is performed after every growth run in order to restore the initial status of the reactor. We have also optimized the hardware design, securing a uniform surface temperature on the wafer. Wafers

bend during the epitaxial growth because of the different lattice constant of the deposited epitaxial layers. We carefully track the hardware parts used in the reactor, since they change their characteristics due to the high temperatures. In this way we have succeeded in growing HEMT structures reproducibly in different runs, (uniformity below 2 % on each wafer and variation of sheet resistance within 5 % of the targeted value for each wafer in different epitaxial runs). This value is compatible with industrial standards, even outperforming the typical specifications given by industrial suppliers of AlGaIn/GaN HEMT structures.

We have also successfully adapted our process to unusually thin SiC substrates. The thickness of the substrate plays an essential role in the epitaxial process, since it affects the thermal budget of the wafer and therefore the effective temperature at which the chemical reactions occur upon the wafer during the run. By adjusting the wafer carriers and by modifying the thickness of the initial epitaxial nucleation layer we were able to achieve our best results in terms of uniformity and reproducibility on these special substrates. Hence, we have demonstrated that we are able to adapt our epitaxial process to substrates of different thicknesses which is of great importance to industrial customers.



- 3** *Map of the sheet resistance (in Ω/sq) of a HEMT structure deposited on a 100 mm SiC wafer, with an average value of 330 Ω/sq and a standard deviation below 0.5%.*

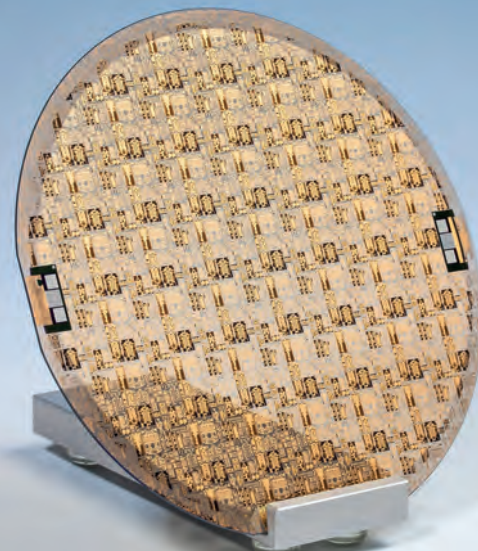
Karte des Schichtwiderstandes (in Ω/sq) einer HEMT-Struktur, auf einem 100 mm SiC-Wafer, mit einem Durchschnittswert von 330 Ω/sq und einer Standardabweichung unter 0,5%.

- 4** *AlGaInGaN HEMT structures fabricated on a 100 mm SiC wafer.*

AlGaInGaN-HEMT-Strukturen hergestellt auf einem 100 mm SiC-Wafer.

durch einen hohen Wasserstofffluss über die Waferoberfläche geleitet. Bis zu elf Wafer mit jeweils 100 mm Durchmesser können in den Reaktor geladen werden, der speziell darauf abgestimmt ist, solche Epitaxieschichten abzuscheiden.

Eine der wesentlichen Herausforderungen liegt darin, die Epitaxieschichten gleichförmig auf jeden Wafer aufzuwachsen. Um dieses Ziel zu erreichen, haben wir eine optimale Einstellung der Gasströmungsdynamik erarbeitet, welche auf die zu epitaxierende Schichtenfolge und das zu verwendende Substrat angepasst ist. Der Schichtwiderstand der HEMT-Struktur, der stark von Dicke und Zusammensetzung der Barriere- und Deckschichten abhängt, weist eine Standardabweichung von weniger als 2 % über den Wafer auf (Abb. 2). Dieser Wert liegt innerhalb typischer Spezifikationen, wie sie von industriellen Lieferanten von Epitaxieschichten angeboten werden. Eine andere Herausforderung ist die Reproduzierbarkeit von einem Epitaxielauf zum folgenden. Sie kann durch Änderungen am Aufbau des MOCVD-Reaktors in verbessertem Maße erreicht werden. Eine Verspannung des Wafers während des Wachstums kann bei der Verwendung sehr hoher Temperaturen nach aufeinander folgenden Läufen das Ergebnis des epitaktischen Wachstums stark beeinträchtigen. Um dies zu vermeiden, haben wir einen speziellen Ausheizprozess entwickelt, der nach jedem Wachstumslauf durchgeführt wird und den Anfangszustand des Reaktors so weit wie



möglich wieder herstellt. Darüber hinaus haben wir den Aufbau des Reaktors modifiziert, um eine gleichmäßige Oberflächentemperatur auf dem Wafer sicherzustellen. Wir überwachen die Eigenschaften der im Reaktor verwendeten Komponenten sorgfältig, da sie sich bei hohen Temperaturen ändern können. Damit ist es uns gelungen, in verschiedenen Durchläufen reproduzierbar HEMT-Strukturen mit denselben Eigenschaften und hervorragender Uniformität (besser als 2 % auf jedem Wafer) zu wachsen, bei denen die Variation des Flächenwiderstands von Lauf zu Lauf innerhalb von 5 % des Zielwertes liegt. Dieser Wert ist mit Industriestandards kompatibel und übertrifft sogar die typischen Spezifikationen der industriellen Lieferanten von AlGaInGaN-HEMT-Strukturen.

Wir haben unser Verfahren auch erfolgreich auf außergewöhnlich dünne SiC-Substrate angepasst. Die Dicke des Substrats spielt eine wesentliche Rolle im Epitaxieprozess, da sie die Wärmekapazität des Wafers und daher die effektive Temperatur beeinflusst, bei welcher die chemischen Reaktionen auf dem Wafer stattfinden. Durch Optimieren der Waferteller und durch Modifizieren der Dicke der anfänglichen epitaktischen Keimbildungsschicht konnten wir auf diesen speziellen Substraten die besten Ergebnisse in Bezug auf Uniformität und Reproduzierbarkeit erzielen. Unseren Epitaxieprozess können wir somit an Substrate unterschiedlicher Dicke anpassen, was für Kunden aus der Industrie von großem Interesse ist.

INSTITUTE IN FIGURES



Institut in Zahlen

BUILDING SITES

Aktuelle Bauvorhaben



HIGHLIGHTS

Höhepunkte

APPENDIX

○ Anhang

98 PATENTS
Patente

99 EDUCATION AND TEACHING
Ausbildung und Lehre

100 GUESTS
Gäste

102 COMMITTEES, CONFERENCES, FAIRS
Gremien, Tagungen, Messen

104 PUBLISHING NOTES
Impressum

92

ORGANIZATIONAL STRUCTURE

Organisationsstruktur 2017

Institute in Figures

Institut in Zahlen

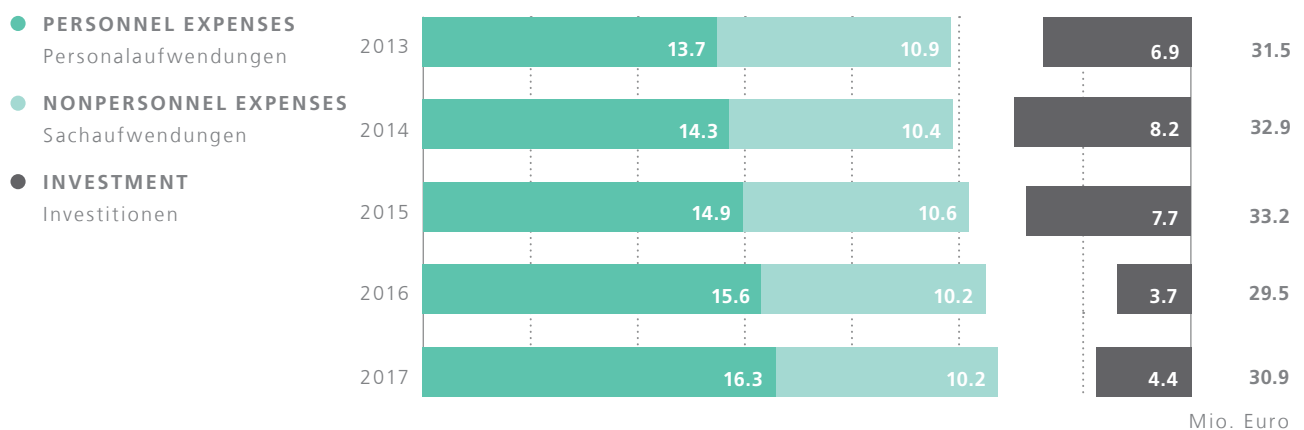
Beatrix Schwitalla – beatrix.schwitalla@iaf.fraunhofer.de

In 2017, the operating budget of Fraunhofer IAF amounted to € 26.5 million. This marks an increase of 3 % to the previous year, which can be chiefly attributed to the rise in personnel expenses to € 16.3 million. Due to lower expenses on energy nonpersonnel expenses could be kept stable at € 10.2 million. After a year of consolidation, current investments increased again to € 4.4 million. In addition, a further € 3.3 million could be spent on advanced technological equipment as part of a special investment program funded by the BMBF to setup the »Research Fab Microelectronics Germany«. At 59 %, the bigger share of the operating budget and the current investments in 2017 came once again from the German Federal Ministry of Defense (BMVg). Industrial revenues increased by 19 % to € 4.2 million, accounting for 37 % of our civil research activities. The total budget of € 30.9 million, which has increased significantly year-on-year, once again proved to be very well financed, thus enabling an overall positive result.

The number of full-time equivalent employees rose to 210 in 2017. The absolute number of employees stood at 271. The percentage of women working at Fraunhofer IAF was 34 %. Of these 271 employees, 187 were directly involved in R&D activities, while 84 worked in the supporting infrastructure of the institute (including managerial positions). Of the employees working directly on R&D, 40 prepared their PhD or master's thesis. Seven staff members were employed at Fraunhofer IAF as part of their vocational training courses or their studies at the Duale Hochschule Baden-Württemberg (Baden-Württemberg Cooperative State University – DHBW), which combines academic studies with workplace training.

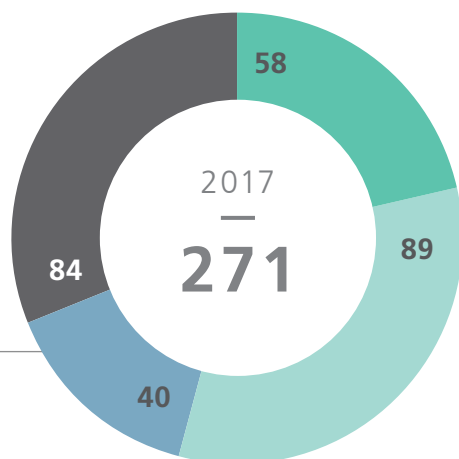
TOTAL BUDGET EXPENSES

Gesamthaushalt Ausgaben



STAFF MEMBERS

Mitarbeiter/-innen



- **SCIENTISTS IN R&D DEPARTMENTS**
Wissenschaftler in Fachabteilungen
- **OTHER STAFF IN R&D DEPARTMENTS**
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter in Fachabteilungen
- **MASTER & PhD STUDENTS IN R&D DEPARTMENTS**
Masterstudierende / Doktoranden in Fachabteilungen
- **INFRASTRUCTURE & MANAGEMENT**
Infrastruktur und Leitung

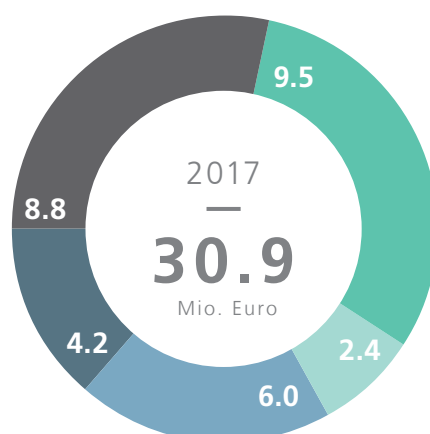
Im Jahr 2017 erzielte das Fraunhofer IAF einen Betriebshaushalt in Höhe von 26,5 Mio. € und lag damit ca. 3 % über dem Vorjahresniveau, wofür hauptsächlich die auf 16,3 Mio. € gestiegenen Personalaufwendungen verantwortlich waren. Die Sachaufwendungen blieben dank geringerer Aufwendungen für Energie mit 10,2 Mio. € nahezu stabil. Die lfd. Investitionen wuchsen nach einem Jahr der Konsolidierung wieder auf 4,4 Mio. €. Zusätzlich wurden im Rahmen des BMBF-finanzierten Programms »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« weitere 3,3 Mio. € als Ausbauinvestitionen in zukunftsweisende technologische Geräte investiert. Der größere Teil des Betriebshaushalts und der lfd. Investitionen wurde auch 2017 vom BMVg mit einem Anteil von etwa 59 % finanziert. Die Industrieerträge wuchsen um 19 % auf 4,2 Mio. €, was einen Anteil von 37 % an den zivilen Forschungsaktivitäten bedeutet. Der deutlich gegenüber dem Vorjahr gestiegene Gesamthaushalt in Höhe von 30,9 Mio. € zeigte sich wiederum als sehr gut finanziert, so dass erneut ein positives Ergebnis erzielt werden konnte.

Die Zahl der Vollzeit-äquivalenten Beschäftigten stieg in 2017 auf 210 VZÄ. Die absolute Zahl der Beschäftigten lag bei 271 Mitarbeitern. Der Anteil der weiblichen Beschäftigten betrug 34 %. Von den 271 Beschäftigten waren 187 Mitarbeiter direkt in der Forschung und 84 Mitarbeiter in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. Von den Mitarbeitern in der Forschung arbeiteten 40 Personen an ihrer Doktor- oder Masterarbeit. Sieben Mitarbeiter sind zum Zweck ihrer Berufsausbildung oder im Rahmen ihres Studiums an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg am Institut beschäftigt.

TOTAL BUDGET FINANCING

Finanzierung Gesamthaushalt

- **MoD BASIC FUNDING**
BMVg-Grundfinanzierung
- **MoD PROJECTS**
BMVg-Projektfinanzierung
- **CIVILIAN BASIC FUNDING**
Zivile Grundfinanzierung
- **MoER, EC, OTHER**
BMBF, EU, Sonstige
- **INDUSTRY**
Industrie



Building Sites

Aktuelle Bauvorhaben

Cutting-edge research in the field of III-V semiconductor technology requires state-of-the-art equipment to structure the increasingly small devices. The smaller the structures, the higher the effort in cleanroom technology and the associated infrastructure. In 2017, the renovation of the cleanroom was largely completed, creating space for the next generation of equipment. The clean room was statically reinforced to accommodate a new electron-beam writer for high-resolution lithography. In addition, the cleanroom's ventilation was renewed, the entire lighting was replaced and the gowning rooms completely rebuilt. The renovation work in the cleanroom was largely carried out during operation during the summer months. Thanks to the good cooperation of everyone, involved downtime could be limited to three weeks in August.

The next step is the relocation of all MOCVD machines to the new building. Construction started in August 2017 together with the construction of the laboratory building. The completion of the two projects is planned for mid-2019.

After the completion of the laboratory building, the measurement laboratories for the business units »Semiconductor Lasers«, »Photodetectors« and »Diamond Devices« will be housed in the new rooms. At the same time, the relocation of these laboratories to the new building creates free space in the existing building, which will enable the successive refurbishment of the then 50-year-old main building from 2021 onwards.

LABORATORY BUILDING

Floor space: 23 laboratories with 900 m²

Cost: € 7.4 million

Financing: BMBF, Land Baden-Württemberg



MOCVD BUILDING

Floor space: 480 m²

Cost: € 5.8 million

Financing: BMVg





Spitzenforschung im Bereich der III-V-Halbleitertechnologie benötigt hochmoderne Geräte zur Strukturierung der immer kleiner werdenden Bauelemente. Je kleiner die Strukturen werden, desto höher ist der Aufwand in der Reinraumtechnik und der zugehörigen Infrastruktur. So konnten im Jahr 2017 die Arbeiten zur Renovierung des Reinraums weitgehend abgeschlossen werden, damit auch die nächste Generation von Geräten im Reinraum des Instituts installiert werden kann. Für eine neue Elektronenstrahl-Lithographieanlage wurde der Reinraum statisch ertüchtigt. Zudem wurden die Reinraumlüftung erneuert, die gesamte Beleuchtung ausgetauscht und der Schleusenbereich komplett neu aufgebaut. Die Renovierungsarbeiten wurden zum größten Teil im laufenden Betrieb während der Sommermonate durchgeführt. Ein Stillstand der Prozesstechnologie konnte – dank der guten Zusammenarbeit aller Beteiligten – auf drei Wochen im August begrenzt werden.

Als nächster Schritt ist der Umzug aller MOCVD-Anlagen in ein sich im Bau befindendes Gebäude vorgesehen. Der Bau der MOCVD-Halle wurde zusammen mit dem Bau des Laborgebäudes im August 2017 begonnen, die Fertigstellung der beiden Bauvorhaben ist bis Mitte 2019 geplant.

Mit der Fertigstellung des Laborgebäudes können dann auch die Messtechniklabore für die Geschäftsfelder Halbleiterlaser, Photodetektoren und Diamantbauelemente in neuen Räumen untergebracht werden. Gleichzeitig wird mit dem Umzug dieser Labore in das neue Laborgebäude Rochadefläche im Bestandsgebäude geschaffen, die ab dem Jahr 2021 eine abschnittsweise Sanierung des dann 50 Jahre alten Hauptgebäudes ermöglicht.

CLEANROOM RENOVATION

Floor space: 1,000 m²

Cost: € 4.0 million

Financing: BMVg, Fraunhofer



Organizational Structure

Organisationsstruktur 2017





**Executive Director (acting)
Division Director
Business Units**

Prof. Dr. Joachim Wagner
Phone +49 761 5159-352
joachim.wagner@iaf.fraunhofer.de



Marketing & Communications

Dr. Anne-Julie Maurer
Phone +49 761 5159-282
anne-julie.maurer@iaf.fraunhofer.de



Administration

Dr. Beatrix Schwitalla
Phone +49 761 5159-414
beatrix.schwitalla@iaf.fraunhofer.de

Deputy Head: Claudia Daghero

Business Units



High Frequency Electronics

Dr. Michael Schlechtweg
Phone +49 761 5159-534
michael.schlechtweg@iaf.fraunhofer.de

Deputy Head: Dr. Axel Hülsmann



Photodetectors

Dr. Robert Rehm
Phone +49 761 5159-353
robert.rehm@iaf.fraunhofer.de

Deputy Head: Dr. Volker Daumer



Power Electronics

Dr. Rüdiger Quay
Phone +49 761 5159-843
ruediger.quay@iaf.fraunhofer.de

Deputy Head: Dr. Patrick Waltereit



Semiconductor Lasers

Dr. Ralf Ostendorf
Phone +49 761 5159-638
ralf.ostendorf@iaf.fraunhofer.de

Deputy Head: Jan-Philip Jarvis



Diamond Devices

Dr. Christop Nebel
Phone +49 761 5159-291
christoph.nebel@iaf.fraunhofer.de

Deputy Head: Dr. Verena Züribig

Highlights Höhepunkte

43rd FREIBURG INFRARED COLLOQUIUM



ADVANCES IN INFRARED TECHNOLOGY — The »43rd Freiburg Infrared Colloquium« from March 14 – 15, 2017, at Fraunhofer IAF showed groundbreaking new developments in infrared technology. With a record number of over 130 participants, the conference brought together international players from a wide range of economic and scientific branches. With more than 40 lectures the program of the workshop covered a wide range of topics: Renowned guest speakers from Europe, Israel, the US and Australia presented their latest research results, new developments in the manufacturing process of devices and applications in various industries. In addition to traditional applications in the fields of safety, security and space, the use of infrared technology now ranges from medical diagnostics, gas analysis and spectroscopy to materials processing and climate research.

Neuheiten in der Infrarot-Technologie — Im Rahmen des »43. Freiburg Infrared Colloquiums« wurden vom 14. – 15.

März 2017 am Fraunhofer IAF wegweisende Neuentwicklungen der Infrarot-Technologie präsentiert. Mit einer Rekordzahl von über 130 Teilnehmern brachte die Konferenz internationale Akteure aus den verschiedensten Wirtschafts- und Wissenschaftszweigen zusammen. Mit mehr als 40 Vorträgen deckte das Programm des Workshops ein breites Themenspektrum ab: Renommierte Gastvortragende aus Europa, Israel, USA und Australien präsentierten ihre aktuellsten Forschungsergebnisse, neue Entwicklungen beim Herstellungsprozess von Bauteilen sowie Einsatzmöglichkeiten in den verschiedensten Industriezweigen. Neben den traditionellen Anwendungen in den Bereichen wie Schutz, Sicherheit und Raumfahrt reicht der Einsatz der Infrarot-Technologie inzwischen von medizinischer Diagnostik, Gasanalyse und Spektroskopie bis hin zur Materialverarbeitung und Klimaforschung.

○ HAPPY BIRTHDAY

ANNIVERSARY: 60 YEARS OF IAF — Last year, Fraunhofer IAF was happy to celebrate a big birthday: 60 years ago, the institute now known as the »Institute for Applied Solid State Physics« was founded as the »Institute for Electrical Materials IEW«. Celebrating this event on July 13th, the staff and the alumni of the institute looked back on important research achievements, patents, prestigious prizes, eight heads of the institute and many personal stories that shaped working and everyday life at IAF. Highlights of recent decades include the invention of the white LED, the patenting of a CVD reactor for diamond deposition, and the development of high performance detector chips for thermal imagers and radiation-resistant amplifiers, which ESA sent into space. Personal stories of the IAF staff were also told: A colorful exhibition showed what people have been working on, experiencing and researching at IAF in the past 60 years.



Jubiläum: 60 Jahre IAF — Das Fraunhofer IAF freute sich im letzten Jahr über einen runden Geburtstag: Vor 60 Jahren wurde das IAF als »Institut für Elektrowerkstoffe IEW« gegründet. Bei einer Jubiläumsfeier am 13. Juli blickten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gemeinsam mit den Alumni des Instituts zurück auf bedeutende Forschungsergebnisse, Patente, renommierte Preise, acht Institutsleiter und viele persönliche Geschichten, die das Arbeits- und Alltagsleben am IAF geprägt haben. Highlights der letzten Jahrzehnte waren unter anderem die Erfindung der weißen LED, die Patentierung des CVD-Plasmareaktors zur Diamant-Abscheidung sowie die Entwicklung von Hochleistungs-Detektorchips für Wärmebildkameras und strahlungsresistenten Verstärkern, die von der ESA ins All geschickt wurden. Auch persönliche Geschichten der IAF-Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wurden erzählt: Eine Ausstellung zeigte, was Menschen in 60 Jahren am IAF erarbeitet, erlebt, geforscht und erfahren haben.

RESEARCH FAB MICROELECTRONICS GERMANY

REGIONAL KICK-OFF FOR THE »RESEARCH FAB MICROELECTRONICS« —

On July 18, 2017, Fraunhofer IAF celebrated the Baden-Württemberg kick-off of the »Research Fab Microelectronics Germany« (FMD) with renowned guests from politics, industry and science. Fraunhofer IAF is one of 13 institutes nationwide that work together in the FMD. With the investments in the FMD as part of the framework program »Microelectronics from Germany - Innovation Drivers of Digitization«, the German Ministry for Education and Research (BMBF) supports research and innovation in microelectronics with a total of around € 350 million until 2020. Fraunhofer IAF in Freiburg receives a funding of € 16 million, which will be invested in the most up-to-date equipment for compound semiconductor growth, device processing and characterization. The close cooperation between the institutes aims at improving the European semiconductor and electronic industries' position on the global market.

Regionaler Auftakt für die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« —



Mit Gästen aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft fand am 18. Juli 2017 am Fraunhofer IAF der Auftakt der »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« in Baden-Württemberg statt. Das Fraunhofer IAF ist eines von bundesweit 13 Instituten, die in der »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« (FMD) zusammenarbeiten. Mit den Investitionen in die FMD als Teil des Rahmenprogramms »Mikroelektronik aus Deutschland – Innovationstreiber der Digitalisierung« unterstützt das BMBF Forschung und Innovation in der Mikroelektronik mit insgesamt rund 350 Millionen Euro bis 2020. Das Fraunhofer IAF in Freiburg erhält eine Förderung in Höhe von 16 Millionen Euro, die in modernstes Equipment investiert wird. Ziel der Kooperation ist es, die Position der europäischen Halbleiter- und Elektronikindustrie im globalen Wettbewerb zu stärken.

INDUSTRY WEEK

INDUSTRY WEEK BADEN-WÜRTTEMBERG — In cooperation with four other Fraunhofer institutes located in Freiburg, Fraunhofer IAF supported the »Industry Week Baden-Württemberg« with two events: First, the Fraunhofer Industry Forum for invited representatives from business and industry and second, an interactive Fraunhofer exhibition for school classes and the wider public. Five keynote presentations about cooperation projects between the industry and Fraunhofer in Baden-Württemberg and ten exhibits gave much input for interesting discussions at the Fraunhofer Industry Forum. The accompanying exhibition provided insight into the institutes' work and illustrated how ideas from research, together with industry, are transferred into application for the benefit of the people.

Industriewoche Baden-Württemberg — Das Fraunhofer IAF unterstützte gemeinsam mit den vier anderen Freiburger Fraunhofer-Instituten die Industriewoche Baden-Württemberg gleich mit zwei Veranstaltungen: zum einen mit dem Fraunhofer-Industrieforum für geladene Vertreter aus Wirtschaft und Industrie und zum anderen mit einer interaktiven Fraunhofer-Ausstellung für Schulklassen und die breite Öffentlichkeit. Das Fraunhofer-Industrieforum bot mit fünf Impulsvorträgen zu Kooperationsprojekten zwischen Industrie und Fraunhofer in Baden-Württemberg sowie zehn Exponaten Input für interessante Gespräche zwischen Industrie und Forschung. Mit der Ausstellung brachten die Institute der breiten Öffentlichkeit ihre Arbeit näher und zeigten, wie Ideen aus der Forschung zusammen mit der Industrie zum Wohle der Menschen umgesetzt werden.

TRADE FAIRS

HANNOVER MESSE, PCIM, LASER WORLD OF PHOTONICS, PRODUCTRONICA — In 2017, Fraunhofer IAF presented its latest scientific achievements and technology developments at four different trade fairs, establishing new contacts with potential clients and partners. At the Hannover Messe, which took place in April, Fraunhofer IAF exhibited a radar scanner to detect defects in fiberglass-reinforced plastics. At PCIM Europe in May IAF introduced the world's first half-bridge circuit of the important 600 V class. In June, the institute was present at the Laser World of Photonics, which was held alongside the CLEO Europe scientific conference. IAF showcased its most recent highlights in optoelectronics: spectrally tunable quantum cascade lasers in the range between 4 and 11 μm as well as the 2.X μm tunable semiconductor disk laser with kHz line width and 2 W output power. Finally, at the Productronica in November, Fraunhofer IAF presented itself for the first time within the »Research Fab Microelectronics Germany« as a member of the »Compound Semiconductor« technology park.

Hannover Messe, PCIM, Laser World of Photonics, Productronica — Im Jahr 2017 präsentierte das Fraunhofer IAF auf vier Messen seine neuesten Entwicklungen und konnte dabei vielversprechende Kontakte zu potenziellen Kunden und Partnern knüpfen. Auf der Hannover Messe im April stellte das Fraunhofer IAF einen Radar-Scanner zur Untersuchung von Defekten in glasfaserverstärkten Kunststoffen vor. Im Mai präsentierte das Fraunhofer IAF auf der PCIM Europe die weltweit erste Halbbrückenschaltung der wichtigen 600-Volt-Klasse. Mit den Themen Laser und LED war das Fraunhofer IAF auf der Laser World of Photonics im Juni vertreten und zeigte unter anderem seine spektral abstimmbaren Quantenkaskadenlaser im Bereich 4 – 11 μm sowie 2.X μm abstimmbare Halbleiter-Scheibenlaser mit kHz-Linienbreite und 2 W Ausgangsleistung. Auf der Productronica im November präsentierte sich das IAF zum ersten Mal innerhalb der »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« als Teil des Technologieparks »Verbindungshalbleiter«.



Patents

Patente

Granted Patents

Patenterteilungen

R. Reiner

Fractal Structures of Power Semiconductor Devices
US 9,577,056 B2, 21.02.2017; USA (US)

A. Hülsmann, K.-F. Becker (Fraunhofer IZM),

H. von Rosenberg (Fraunhofer IPA)

Millimeter Wave Radar

US 9,583,827 B2, 28.02.2017; USA (US)

P. Dennler

Reactively Matched Amplifier Using a Distributed Active Power Splitter as a Driver Stage

US 9,634,630 B2, 25.04.2017; USA (US)

S. Maroldt

Integrated inverter circuit using unipolar transistors

US 9,716,473 B2, 25.07.2017; USA (US)

T. Töpfer, M. Rattunde, M. Kaspar, J. Wagner

Optically pumped Semiconductor Disk Laser

US 9,716,364 B2, 25.07.2017; USA (US)

M. Rieble

Ausstoßvorrichtung zum Abheben eines Chips von einem Trägermaterial

DE 10 2012 013 370, 09.08.2017; Deutschland (DE)

R. Hoffmann, C. Nebel

Vorrichtung und Verfahren zur Expansion von Graphit zu Graphen

DE 10 2016 202 202, 25.08.2017; Deutschland (DE)

Patent Applications

Patentanmeldungen

T. Gerrer, V. Cimalla, T. Yoshikawa, M. Preschle

Verfahren zum Transfer zumindest einer Dünnschicht
10 2017 202 793.2, 21.02.2017; Deutschland (DE)

C. Giese, C. Nebel

Einkristalline Diamant-Dünnschichten auf beliebigen Substraten

EP 17159462.5, 06.03.2017; Europa (EP)

C. Giese, C. Nebel

Sensor und Verfahren zu dessen Herstellung und Verwendung

EP 17159463.3, 06.03.2017; Europa (EP)

F. Benkhelifa

Halbleiterbauelement

10 2017 210 711.1, 26.06.2017; Deutschland (DE)

US 15/634,210, 27.06.2017; USA (US)

F. van Raay

Matrix Power Amplifier

WO 2017133776 A1, 10.08.2017; Weltorganisation für geistiges Eigentum (WO)

US 15/809,502, 10.11.2017; USA (US)

V. Züribig, C. Nebel

Semiconductor device comprising diamond and method for its manufacturing

US 15/697,743, 07.09.2017; USA (US)

T. Merkle

Vorrichtung, Netzwerk und Verfahren zur Erlangung einer definierten Phasenverschiebung

10 2017 122 450.5, 27.09.2017; Deutschland (DE)

R. Amirpour

Anti-serieller Varaktor mit hoher Güte in Halbleiter Heterostrukturen

10 2017 125 162.6, 26.10.2017; Deutschland (DE)

Education and Teaching

Ausbildung und Lehre

Academic Lectures and Seminars

Vorlesungen und Seminare

Volker Cimalla

Diamantelektronik;
Sommerschule Smart Diamonds, Elgersburg, September 2017

Lutz Kirste

Theory and Applications of X-ray Diffractometry;
Universität Freiburg, WS 2016/2017, WS 2017/2018

Dominik Meier

Erstsemesterprojekt Teambildung, Programmierung NAO-Roboter;
Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2016/2017

Optoelektronik;

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, SS 2017

Christoph Nebel

Solid State and Semiconductor Physics; Universität Freiburg, SS 2017

Matthias Ohlrogge

Hochfrequenztechnik in der Schaltungstechnik;
Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2016/2017

Rüdiger Quay

RF and Microwave Circuits and Systems;
Universität Freiburg, WS 2016/2017, WS 2017/18

RF and Microwave Devices and Circuits;

Universität Freiburg, SS 2017

Design Course: RF and Microwave Circuits and Systems;

Universität Freiburg, SS 2017

Power Electronics: Devices and Concepts;

Universität Freiburg, WS 2016/2017, WS 2017/18

Renewable Energy Management (REM) Elective Track Energy
Systems: Hardware and Control;
Universität Freiburg, WS 2017/18

Frauke Steinhagen

Wissenschaftliches Arbeiten;
Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, SS 2017

Regelungssysteme;

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2016/2017

Bildverarbeitung;

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2016/2017

Joachim Wagner

Grundlagen der Halbleiterphysik;
Universität Freiburg, WS 2016/2017, WS 2017/2018

Martin Walther

Quanteneffektbauelemente und Halbleitertechnologie;
Karlsruher Institut für Technologie KIT, SS 2017

Verena Zürbig

Diamond at Fraunhofer IAF;
Seminar at the Center for Quantum Science and Technology,
Macquarie University of Sydney, Australia, June 2017

Diamant am Fraunhofer IAF;

Seminar am CIS Forschungsinstitut für Mikrosensorik, Erfurt,
November 2017

Diamant für die Leistungselektronik;

DGKK-Arbeitskreistreffen Massive Halbleiter, Freiberg, Oktober 2017

Doctoral Theses completed in 2017

Promotionen

Bleh, Daniela

W-Band FMCW MIMO radar demonstrator system for 3D imaging; Universität Freiburg

Holl, Peter

Halbleiter-Scheibenlaser und ihre Integration in anwendungsspezifische Resonatoren; Universität Freiburg

Jarvis, Jan

A Contribution to Active Infrared Laser Spectroscopy for Remote Substance Detection; KIT Karlsruhe

Klenner, Mathias

Spectroscopic Millimeter Wave Ellipsometry; Universität Freiburg

Knöbber, Fabian

Entwicklung piezoelektrisch adaptive Aluminiumnitrid/Diamant-Linsen für mikrooptische Systeme; Universität Freiburg

Reiner, Richard

Design and characterization of highly-efficient GaN-HEMTs for power applications; Universität Freiburg

Ture, Erdin

GaN-Based Tri-Gate high electron mobility transistors; Universität Freiburg

Weiß, Beatrix

Fast-Switching Monolithically Integrated High-Voltage GaN-on-Si Power Converters; Universität Freiburg

Wespel, Matthias

The role of charge trapping in AlGaIn/GaN-on-Si HEMT based power switches; Universität Freiburg

Widmann, Claudia

Characterization and Optimization of Nanoscale Magnetometric Diamond Sensors; Universität Freiburg

Yoshikawa, Taro

Toward Ultra-Thin Nanocrystalline Diamond Film Growth: Electrostatic Self-Assembly of Non-Aggregated Diamond Nanoparticles onto Substrate Surfaces; Universität Freiburg

Master Theses completed in 2017

Masterarbeiten

Derguti, Edon

Investigations of GaN-based Multi-Way Doherty Amplifiers at 5.8 GHz for 5 G Applications; Universität Freiburg

Dittrich, Niklas

Design and characterization of drive and control techniques for GaN-based point-of-load converters in the MHz regime; Universität Freiburg

Gashi, Bersant

Untersuchung von effizienten 5G-Verstärkern hinsichtlich des Einsatzes in gesteuerten Antennen; Universität Freiburg

Georgiou-Sarlikiotis, Vasileios

Functionalization of Ceramic Phosphors for White LEDs; Universität Freiburg

Götz, Lukas

Charakterisierung einer Serie von GaInAs/AlInAs-Alvanche-Dioden im Geiger-Modus; Universität Freiburg

Heinz, Felix

Investigation of the RF-noise performance in InGaAs MOSFET devices; Universität Freiburg

Lacher, Philipp

Entwicklung und Aufbau eines kompakten kosteneffizienten GaN-Schaltwandlers als Hilfsspannungsversorgung für industrielle Batterie-Inselwechselrichter; Universität Freiburg

Guests Gäste

Lindner, Chiara

Spektrale Eigenschaften von GaSb-basierten Halbleiter-Scheibenlasern; Universität Freiburg

Mohankumar, Mega Hireallur

Digital signal processor based real-time frequency modulated continuous wave radar signal processing; Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft

Neininger, Philipp

Untersuchung kompakter und effizienter Leistungsverstärker-Module für 5G-MIMO-Antennen-Anwendungen bei 3,5 GHz; KIT, Karlsruhe

Schiefer, Dennis

Prozessentwicklung für CVD-Graphen - Parameterstudie und Charakterisierung; Hochschule Esslingen

Stojanovski, Martin

Millimeter-Wave Radar Applications; Universität Freiburg

ul Haq, Usman

Simulation and Modeling of a Sensor for Transient and High Frequency ESD Interference Environment; Universität Freiburg

Zöllin, Marc

Untersuchung zu bildgebenden Verfahren für ein Radar mit synthetischer Apertur im Nahbereich; Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft

Bachelor Theses completed in 2017

Bachelorarbeiten

Goodchild, Chandran

Investigation of a VDHL Implementation of the Data Preprocessing for a FMCW MIMO mm-Wave Camera; Universität Freiburg

Guest Scientists

Gastwissenschaftler

Dr. Gilberto A. Umana-Membreno

University of Western Australia, Australia

Prof. Giacinta Parish

University of Western Australia, Australia

Committees, Conferences, Fairs Gremien, Tagungen, Messen

Committee Activities

Arbeit in Fachgremien

Martina Baeumler

- International Steering Committee »International Convergence on Defects Recognition, Imaging & Physics in Semiconductors DRIP«; Member
- International Steering Committee »Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies EXMATEC«; Member

Volker Cimalla

- Program Committee »Solid-State Device Research Conference ESSDERC«; Member

Rüdiger Quay

- IEEE Electron Devices Society Committee »Compound Semiconductor Devices and Circuits«; Member
- IEEE Technical Committee »MTT-6 Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits«; Co-Chair
- EURAMIG European Radio and Microwave Interest Group; Core Group Member
- Technical Program Committee »International Microwave Symposium IMS 2017«; Member
- Associate Editor »IEEE Electron Device Letters«
- Associate Editor »International Journal of Microwave and Wireless Technologies«

Robert Rehm

- 1st International UV WORKshop, Olching; International Advisory Board
- 43rd Freiburg Infrared Colloquium, Freiburg, March 14 – 15, 2017; Chair

Frank Rutz

- »VDI/VDE-GMA Fachausschuss 8.16 Temperaturmessung mit Wärmebildkameras«; Member
- Program Committee »4th International Workshop on Infrared Technologies«; Member

Michael Schlechtweg

- Program Committee »Ganex 2016«; Member
- VDE-ITG, Fachausschuss »THz Funksysteme«; Member
- Sachverständiger bei der Evaluierung des Leibnitz-Instituts für Innovative Mikroelektronik (IHP)

Joachim Wagner

- Board of Directors, Fraunhofer UK »Center for Applied Photonics«, Strathclyde (UK); Member
- Associated Member of Freiburger Materialforschungszentrum (FMF); Universität Freiburg; Member

Martin Walther

- Program Committee »Compound Semiconductor Week 2017«; Chair
- Program Committee »8th International Symposium on Optoelectronics in Defense and Security«; Member
- Program Committee »Infrared Sensors and Systems IRS2 2017«; Member

Conference Organisation

Tagungsorganisation

Volker Daumer

*43rd Freiburg Infrared Colloquium, Freiburg,
March 14 – 15, 2017*

Christoph Nebel

*E-MRS Fall Meeting 2017
Symposium »Diamond for Electronic Devices«
Warsaw, September 18 – 21, 2017*

Rüdiger Quay

*European Microwave Week (EuMW)
Student Design Competition Chair
Nuremberg, September 2017*

Rüdiger Quay, Roger Kaul, Nils Pohl

*International Microwave Symposium IMS 2017
Student Design competitions »SDC-6«
Honolulu, June 2017*

Exhibitions and Fairs

Ausstellungen und Messen

Freiburger Infrarot-Kolloquium

March 14 – 15, Freiburg

Hannover Messe

April 24 – 28, Hannover

Compound Semiconductor Week (CSW)

May 14 – 18, Berlin

Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM)

May 16 – 18, Nuremberg

Industrieforum Freiburg

June 21 – 22, Freiburg

Laser World of Photonics

June 26 – 29, Munich

Wissenschaftsmarkt

July 14 – 15, Freiburg

European Microwave Week (EuMW)

October 8 – 13, Nuremberg

Productronica

November 14 – 17, Munich

Publishing Notes

Impressum

Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF

Tullastrasse 72
79108 Freiburg, Germany
Tel. +49 761 5159-0
Fax +49 761 5159-400
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de

Marketing and Communications

Dr. Anne-Julie Maurer
Tel. +49 761 5159-282
anne-julie.maurer@iaf.fraunhofer.de

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 IAF, Freiburg 2018

Editorial Board / Redaktion

Laura Hau, Sandra Iselin,
Anne-Julie Maurer, Julia Roeder
Joachim Wagner, Martin Walther

Layout, Typesetting, Printing / Layout, Satz, Druck

netsyn, Joachim Würger, Freiburg

Photos

Fotos

spainter_vfx – Fotolia.com (p. 21);
JohanSwanepoel – Fotolia.com (p. 24);
Eutelsat Communications S.A. (p. 26);
Gorodenkoff – Fotolia.com (p. 42);
Ralf Geithe – Fotolia.com (p. 50);
Michael – Fotolia.com (p. 54);
AIM Infrarot-Module GmbH (p. 57);
benjaminolte – Fotolia.com (p. 60);
Fraunhofer IPA (p. 62);
Universität Stuttgart, Institut für
Signalverarbeitung und Systemtheorie ISS (p. 63);
onizu3d – Fotolia.com (p. 64);
Simon Kraus – Fotolia.com (p. 70);
stnazkul – fotolia.com (p. 82);
SSP AG (p. 90 left);
SSP AG (p. 90 right);
Fraunhofer ILT, K. Wolf (p. 97 top);
Fraunhofer EMI (p. 97 bottom).

Fairs and Conferences 2018

Messen und Veranstaltungen 2018

German Microwave Conference	12.03. – 14.03.2018
Analytica	10.04. – 13.04.2018
Hannover Messe	23.04. – 28.04.2018
European Microwave Week	23.09. – 28.09.2018
German MBE-Workshop	11.10. – 12.10.2018

**FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR
ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF**

Tullastrasse 72
79108 Freiburg
Germany
Phone +49 761 5159-0
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de



The Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF develops electronic and optoelectronic devices and circuits on the basis of compound semiconductors. The institute ranks among the leading research facilities worldwide in the area of III-V semiconductors. Our technologies are used in a variety of areas such as security, energy conversion, communication, health, and mobility.

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF entwickelt elektronische und optoelektronische Bauelemente und Schaltungen auf Basis von Verbindungshalbleitern. Das Institut zählt zu den führenden Forschungseinrichtungen weltweit auf dem Gebiet der III/V-Halbleiter. Unsere Technologien werden in unterschiedlichen Bereichen wie Sicherheit, Energie, Kommunikation, Gesundheit und Mobilität eingesetzt.