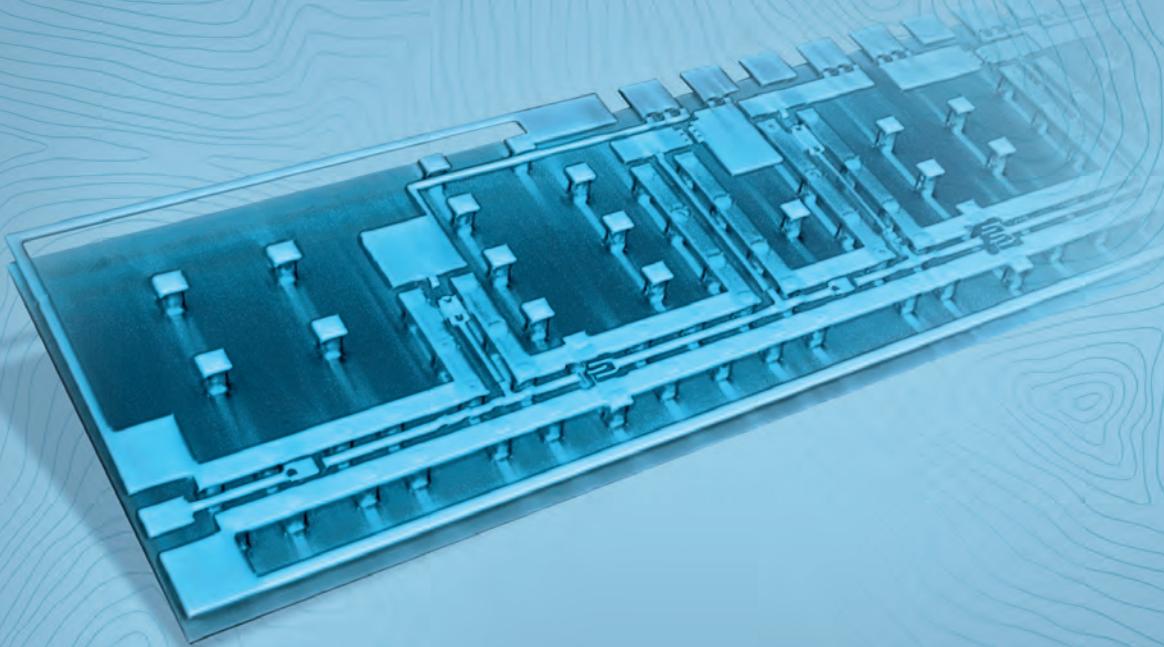




Fraunhofer
IAF

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF



2016 / 2017
**SCIENCE FOR
CUSTOMERS**
ANNUAL REPORT / JAHRESBERICHT

The background of the page features a subtle, abstract pattern of light blue wavy lines that create a sense of depth and motion. These lines are more concentrated in the lower half of the page, forming two distinct circular patterns that resemble topographic maps or ripples in water.

*X-ray view of a circuit: the
3D μ -computer tomography
(μ CT) image of 35 – 58 GHz GaN-
on-SiC broadband power-ampli-
fier fabricated at Fraunhofer IAF
reveals even finest details of the
MMIC.*

*Der Röntgenblick auf einen Milli-
meterwellen-Schaltkreis: das
3D-Computertomographiebild des
35 – 58 GHz GaN-auf-SiC Breit-
band-Leistungsverstärkers erlaubt
es, selbst feinste Details des Chips
zu erkennen.*

The background of the entire page consists of a light blue color with a pattern of thin, wavy, horizontal lines that create a sense of depth and motion. There are several darker, more prominent wavy lines that form a central, organic shape resembling a stylized face or a brain, with a large eye-like opening at the top left and two smaller eye-like openings below it.

2016 / 2017

SCIENCE FOR CUSTOMERS

ANNUAL REPORT / JAHRESBERICHT

06	PREFACE Vorwort
10	ADVISORY BOARD Kuratorium
12	THE RESEARCH AND DEVELOPMENT PORTFOLIO OF FRAUNHOFER IAF Das Forschungs- und Entwicklungs-Portfolio des Fraunhofer IAF

RESEARCH FOR TODAY

Technologien auf dem
Weg in die Anwendung

- 20 • **MILLIMETER-WAVE STEELWORKS RADAR**
Millimeterwellen-Radare für Stahlwerke
- 24 • **INTEGRATED GaN POWER CIRCUITS**
Integrierte GaN-Leistungsschaltkreise
- 28 • **LASER4LEDs – TAILORED LASER PROCESSES FOR LARGE-AREA LEDs**
Laser4LEDs – Maßgeschneiderte Laser-Prozesse für großflächige LEDs
- 32 • **INFRARED LASER APPLICATION LABORATORY**
Applikationslabor für Infrarot-Laser
- 36 • **CVD REACTORS FOR DIAMOND GROWTH**
CVD-Reaktoren für das Wachstum von Diamant

ASSOCIATED BUSINESS UNITS

Zugehörige Geschäftsfelder

- High Frequency Electronics
Hochfrequenzelektronik
- Power Electronics
Leistungselektronik
- Photodetectors
Photodetektoren
- Semiconductor Lasers
Halbleiterlaser
- Diamond Devices
Diamantbauelemente
- Core Competences
Kernkompetenzen

RESEARCH FOR TOMORROW

Schon heute Anforderungen
von Morgen erkennen

- 42 ● CRYOGENIC LNAs FOR MICRO- AND MILLIMETER-WAVE RECEIVERS
Kryogene LNAs für Mikrowellen- und Millimeterwellenempfänger
- 46 ● MILLIMETER-WAVE RADAR CAMERA
Millimeterwellen-Radar-Kamera
- 50 ● RF POWER GENERATION BETWEEN 94 AND 300 GHz
Hochfrequenz-Leistungserzeugung von 94 GHz bis 300 GHz
- 54 ● CHARGE CONTROL OF SINGLE NV CENTERS IN DIAMOND
NV-Zentren in Diamant: Kontrolle des Ladungszustands
- 58 ● INFRARED LASER FOR HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY AND METROLOGY
Infrarotlaser für hochauflösende Spektroskopie und Metrologie
- 62 ● INFRARED DETECTORS FOR SINGLE PHOTONS
Infrarot-Detektoren für einzelne Photonen



RESEARCH FOR THE FUTURE

Ausbau der Kernkompetenzen für zukünftige Innovationen

- 68 • **WAFER-SCALE GRAPHENE**
Graphenbeschichtung auf Waferskala

- 72 • **X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF WIDE-BANDGAP SEMICONDUCTORS**
Röntgenbeugungsanalyse an Halbleitern mit großer Bandlücke

- 80 • **AlScN – DEVELOPMENT OF NOVEL PIEZOELECTRIC MATERIALS**
AlScN – Entwicklung neuartiger piezoelektrischer Materialien

- 84 • **NEW APPROACHES IN CIRCUIT DESIGN**
Neue Ansätze für den Schaltungsentwurf

ASSOCIATED BUSINESS UNITS

Zugehörige Geschäftsfelder

- High Frequency Electronics
Hochfrequenzelektronik
- Power Electronics
Leistungselektronik
- Photodetectors
Photodetektoren
- Semiconductor Lasers
Halbleiterlaser
- Diamond Devices
Diamantbauelemente
- Core Competences
Kernkompetenzen

92 INSTITUTE IN FIGURES
Institut in Zahlen

94 ORGANIZATIONAL STRUCTURE
Organisationsstruktur

96 HIGHLIGHTS 2016/2017
Höhepunkte 2016/2017

100 APPENDIX
Anhang

PROF. DR. JOACHIM WAGNER (re.)

Executive Director (acting)

*Geschäftsführender Institutsleiter
(kommissarisch)*

DR. MARTIN WALther (li.)

Director (acting)

Institutsleiter (kommissarisch)



An interview with the two acting directors of Fraunhofer IAF:

Prof. Dr. Joachim Wagner is also the division director of business units and has been with Fraunhofer IAF since 1985. Dr. Martin Walther is also the division director of departments and has been with Fraunhofer IAF since 1996.

After serving as director of the institute for nearly a decade, Prof. Dr. Oliver Ambacher left the Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF on December 31, 2016 in order to devote himself to teaching and research as part of his professorship at the University of Freiburg. Since January 1, 2017, the two previous deputy directors, Prof. Dr. Joachim Wagner and Dr. Martin Walther, have been leading Fraunhofer IAF together as acting directors.

Mr. Wagner and Mr. Walther, you are here today not only as division directors, but first and foremost in your new role as acting directors of Fraunhofer IAF. What do you plan to do differently?

WAGNER — As acting directors, we see it as our primary role to maintain internal and external continuity. But it's also important to wisely seize opportunities for new research topics and funding formats so that whoever is appointed to succeed Oliver Ambacher has the best possible starting conditions.

WALther — We want to act strategically to continue the success of Fraunhofer IAF. In particular, we want to strengthen our core competences while also exploring new opportunities for cooperation that might make sense for the institute. This echoes the recommendation of this year's technology audit that we focus on depth rather than on further breadth.

Are there any major projects or plans coming up that you would like to push forward? What lies ahead for Fraunhofer IAF in 2017?

WAGNER — In 2017 we will mainly be concerned with establishing the Research Fab Microelectronics Germany which is being funded by the German Ministry for Education and Research. Fraunhofer IAF coordinates the technology park »Compound Semiconductors«. We will be using the funding of 15.6 M € for Fraunhofer IAF mainly for new equipment in order to remain competitive on the global research market for semiconductor industry. I also see particular opportunities in the upcoming funding initiatives for quantum technologies.

WALther — In order to be well positioned internally, we want to move ahead with our two major building projects, the laboratory building and the MOCVD hall, and complete renovations in the clean room.

Will you continue to pursue ongoing projects at the institute? Or is it already clear that some projects will not continue?

WALther — The major research topics in the business units will certainly remain in place and ongoing projects will continue. Projects and research topics which are nearing completion and are not central to our core competences will have to be reassessed, bearing in mind, however, that this is precisely where most innovations arise.

Science for Customers

Gemeinsam mit unseren Partnern voran gehen

Herr Wagner und Herr Walther, heute sitzen Sie hier nicht nur als Bereichsleiter, sondern in erster Linie in Ihrer neuen Funktion als kommissarische Institutsleiter des Fraunhofer IAF. Was werden Sie anders oder neu machen?

WAGNER — Als kommissarische Institutsleiter sehen wir unsere Aufgabe in erster Linie darin, die Kontinuität nach außen und nach innen zu wahren. Es gilt aber auch, Chancen für neue Forschungsthemen und Förderformate klug zu nutzen und so für den zu berufenden Nachfolger bzw. Nachfolgerin von Oliver Ambacher gute Startbedingungen zu schaffen.

WALTHER — Den Erfolgskurs des Fraunhofer IAF möchten wir gezielt fortsetzen. Insbesondere möchten wir unsere Kernkompetenzen schärfen und ausloten, wo weitere Kooperationen für uns sinnvoll sein könnten – ganz im Sinne der Ergebnisse unseres diesjährigen Technologieaudits, das uns Tiefe vor weiterer Breite empfiehlt.

Gibt es bereits größere Projekte oder Vorhaben, die geplant sind und die Sie als neue Leitung gezielt vorantreiben möchten? Was steht 2017 am Fraunhofer IAF an?

WAGNER — 2017 wird uns vor allem die Etablierung der vom BMBF geförderten »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« beschäftigen. Das Fraunhofer IAF koordiniert dabei den Aufbau des Technologieparks »Verbindungshalbleiter«. Die Förderung für das Fraunhofer IAF in Höhe von 15,6 Mio. € werden wir vorrangig in neue Anlagen investieren, um auf dem globalen Markt der Halbleiterforschung für Industriekunden auch zukünftig erfolgreich zu sein. Des Weiteren sehe ich besondere Chancen in den geplanten Förderinitiativen zur Nutzung von Quantentechnologien.

WALTHER — Um für diese Weiterentwicklungen intern gut aufgestellt zu sein, möchten wir die beiden großen Bauvorhaben Laborgebäude und MOCVD-Halle vorantreiben und die Renovierungsmaßnahmen im Reinraum abschließen.

Werden Sie alle am Institut laufenden Projekte weiter verfolgen? Oder ist bereits absehbar, dass manches nicht weitergeführt werden wird?

WALTHER — Die großen Themen in den Geschäftsfeldern werden sicher bleiben und die laufenden Projekte fortgesetzt. Eine differenzierte Betrachtung ist hingegen bei auslaufenden Projekten und Forschungsthemen am Rande der Kernkompetenzen notwendig – wobei ja gerade hier oft die meisten Innovationen hervorgebracht werden.



Ein Interview mit den beiden kommissarischen Institutsleitern des Fraunhofer IAF: Prof. Dr. Joachim Wagner, auch Bereichsleiter der Geschäftsfelder, seit 1985 am Fraunhofer IAF. Dr. Martin Walther, auch Bereichsleiter der Abteilungen, seit 1996 am Fraunhofer IAF.

Nach fast zehnjähriger Tätigkeit als Institutsleiter hat Herr Prof. Dr. Oliver Ambacher das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF zum 31. Dezember 2016 verlassen, um sich im Rahmen seiner Professur der Lehre und Forschung an der Universität Freiburg zu widmen. Die bisherigen stellvertretenden Institutsleiter, Herr Prof. Dr. Joachim Wagner und Herr Dr. Martin Walther, leiten seit dem 1. Januar 2017 gemeinsam als kommissarische Institutsleiter das Fraunhofer IAF.

A noticeable difference in this year's annual report is that it is no longer divided into the various business units. Why this change?

WAGNER — In keeping with the motto of this year's annual report »Science for Customers« we have chosen to present the information in a customer-oriented form which cuts across all business units. That's why we've divided the middle part of the report into three sections. The first section, which focuses on industry-driven projects, highlights our capabilities and what we are already doing today. The second section looks at projects with medium-term objectives. Here we show what will be possible in 5 to 10 years. And the third section centers on our long-term plans for developing those core competences that will be the basis of future innovations.



»In 2017 we will mainly be concerned with establishing the Research Fab Microelectronics Germany.«

Does this new structure also mean that areas of competence will be restructured?

WAGNER — No, the existing structures at Fraunhofer IAF will be retained. The division of labor between Martin Walther as division director of the departments and myself as the division director of the business units will continue unchanged; our duties as acting directors of the institute are in addition to our other tasks.

Have you clearly defined your respective areas of responsibility yet? Who will represent the institute and on which issues – in particular publicly?

WAGNER — As part of my role as division director for the business units, I will take on the role of »foreign minister«. This means that I am the point of contact for industrial customers, the German Federal Ministry of Education and Research and the ministries of the Länder, as well as for universities, the Fraunhofer Group for Microelectronics and Fraunhofer UK.

WALTHER — Along these same lines, my role is rather that of the »interior minister«. I am responsible for the departments and infrastructure as well as the scientific core competences. I am the contact for the German Federal Ministry of Defence (BMVg) and the associated offices as well as for the Fraunhofer Group for Defense and Security. Irrespective of this division of responsibility, which is set down in the rules of procedure, we will of course work together closely and consult with one another extensively. Decisions which affect multiple divisions will be made jointly.

What will happen after the interim period and who will serve as the new director currently remains an open question. What qualifications do you believe the new director should possess?

WALTHER — Along with professional expertise in the broad field of III-V compound semiconductors, I feel that leadership and management experience are particularly important. A strong network across the scientific and research landscape, experience in attracting and leading major projects, as well as strong strategic thinking skills.

The interim period is currently expected to last around 18 months.
In three words, what do you stand for?

WALTHER — For the three Cs: core competence development, communication, cooperation.

WAGNER — Quality, reliability, sustainability.



»Kernkompetenzen schärfen und ausloten, wo weitere Kooperationen sinnvoll sind.«

Wenn man sich den diesjährigen Jahresbericht ansieht, fällt auf, dass er nicht mehr in die verschiedenen Geschäftsfelder untergliedert ist. Was hat es damit auf sich?

WAGNER — Gemäß dem Motto des diesjährigen Jahresberichts »Science for Customers« haben wir eine geschäftsfeldübergreifende, kundenorientierte Darstellung gewählt. Daher haben wir die Inhalte im Mittelteil in drei Bereiche gegliedert. Erstens: industriennahe Projekte, in denen wir zeigen, was wir schon heute können und machen. Zweitens: Projekte mit mittelfristiger Zielsetzung, in denen wir zeigen, was in 5 bis 10 Jahren möglich ist. Und drittens: unsere langfristig angelegte Weiterentwicklung der Kernkompetenzen, die die Basis für zukünftige Innovationen darstellen.

Verschieben sich denn mit dieser Neuordnung auch Kompetenzen?

WAGNER — Nein, die bestehenden Strukturen am Fraunhofer IAF werden weitergeführt. Die bisherige Arbeitsteilung zwischen Martin Walther als Bereichsleiter für die Abteilungen und mir als Bereichsleiter für die Geschäftsfelder wird beibehalten, die Aufgaben der kommissarischen Institutsleitung kommen ergänzend hinzu.

Sind denn zwischen Ihnen die Aufgabenfelder bereits klar abgesteckt? Wer vertritt das Institut zukünftig in welchen Themen – gerade auch nach außen?

WAGNER — Aus meiner Rolle als Bereichsleiter für die Geschäftsfelder heraus übernehme ich die Funktion als »Außenminister«. Ich bin zentraler Ansprechpartner für Industriekunden, Bundesministerium für Bildung und Forschung und Landesministerien, Universitäten sowie den Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik und Fraunhofer UK.

WALTHER — Analog dazu übernehme ich eher die Rolle des »Innenministers«. In dieser Funktion bin ich zuständig für die Abteilungen und die Infrastruktur sowie die wissenschaftlichen Kernkompetenzen. Für das BMVg und die zugehörigen Dienststellen, den Fraunhofer-Verbund Sicherheits- und Verteidigungsforschung bin ich ebenfalls der Ansprechpartner. Unabhängig von dieser Aufgabenteilung, die in der Geschäftsordnung niedergelegt ist, werden wir selbstverständlich eng zusammenarbeiten und uns intensiv beraten. Bereichsübergreifende Entscheidungen werden wir gemeinsam treffen.

Wie und mit wem es nach der Interimszeit weitergeht ist aktuell noch offen. Was sollte die neue Institutsleitung Ihrer Meinung nach mitbringen?

WALTHER — Neben der fachlichen Kompetenz auf dem weiten Gebiet der III/V-Verbindungshalbleiter sehe ich vor allem Führungs- und Managementerfahrung als wichtig an. Gute Vernetzung in Wissenschaft und Forschungslandschaft, Erfahrung bei Akquise und Leitung von großen Projekten sowie ausgeprägtes strategisches Denken.

Aktuell wird von einer Interimszeit von ca. 18 Monaten ausgegangen.

In drei Wörtern: Für was stehen Sie?

WALTHER — Für die drei »K's«: Kernkompetenzentwicklung, Kommunikation, Kooperation.

WAGNER — Qualität, Verlässlichkeit, Zukunftsfähigkeit.

Advisory Board 2016

Kuratorium 2016

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

DR. FRANZ AUERBACH

Infineon Technologies AG, Neubiberg

DR. HANS BRUGGER

(Chairman / Vorsitzender)

Airbus Defence & Space, Ulm

PROF. DR. JÉRÔME FAIST

ETH Zürich

MinR DR. EHRENTRAUD GRAW

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft

Baden-Württemberg, Stuttgart

PROF. DR. RIK JOS

AMPLEON, Nijmegen, Netherlands

Chalmers University of Technology,

Gothenburg, Sweden

DR. FABIAN KOHLER

Bundesministerium für Bildung und Forschung
(BMBF), Bonn

DR. JENS KOSCH

X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt

DR. RAINER KROTH

Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG, Überlingen



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.

DirWTD RAINER KRUG

Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik
und Nutzung der Bundeswehr, Koblenz

PROF. DR. JÜRG LEUTHOLD

ETH Zürich

DR. CONRAD REYNAAN

Hoffmann & Co. Elektrokohle AG, Bad Goisern

BDir WOLFGANG SCHEIDLER

European Defence Agency (EDA), Bruxelles

DR. DIETMAR SCHILL

Sony Deutschland GmbH, Stuttgart

DR. ARNO SIMON

Bruker Optik GmbH, Ettlingen

DR. KLAUS STREUBEL

OSRAM GmbH, Augsburg

MinR NORBERT WEBER

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn

PROF. DR. WERNER WIESBECK

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

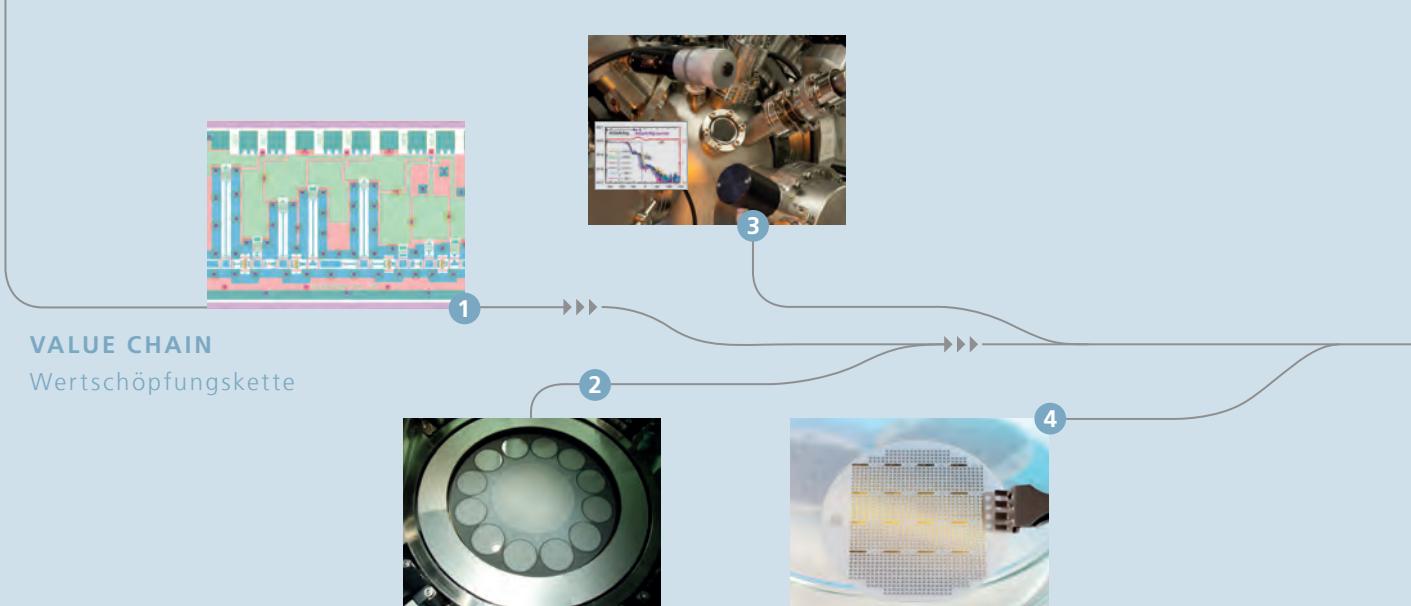
The Research and Development Portfolio of Fraunhofer IAF

- 1** *Circuit design*
Schaltungsdesign
- 2** *Epitaxy of III-V semiconductors*
Epitaxie von III/V-Halbleitern
- 3** *Material Analysis*
Materialanalyse
- 4** *Processed wafers*
Prozessierte Wafer
- 5** *Electronic Circuits*
Elektronische Schaltungen
- 6** *Mounted and packed devices*
Aufgebaute und gehäuste Bauelemente
- 7** *Electronic and optoelectronic modules*
Elektronische und optoelektronische Module
- 8** *System demonstrators*
Systemdemonstratoren

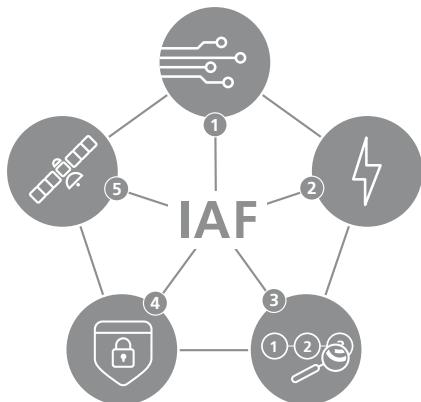
As one of the world's leading research centers focusing on III-V compound semiconductor-based devices and circuits, Fraunhofer IAF provides R&D services and technologies that are of great value for a broad range of application fields. This is reflected in the spectrum of our business units into which we divide our services for external customers and partners. These business units are:
High Frequency Electronics — Power Electronics — Photodetectors — Semiconductor Lasers — Diamond Devices.

The R&D services provided by Fraunhofer IAF are also well aligned along the value chain. They range from pure consultancy, measurement, and design services to the epitaxy of III-V semiconductor heterostructures, the processing of III-V wafers, diced electronic and optoelectronic devices, circuits, and mounted and packed devices.

Fraunhofer IAF can also provide custom-made electronic and optoelectronic modules and, in selected cases, even system demonstrators. The latter are also used to demonstrate the potential of the devices, circuits, and modules developed at Fraunhofer IAF in certain application scenarios, such as the precise measurement of distances in steelworks or the standoff detection of hazardous substances.



Das Forschungs- und Entwicklungs- Portfolio des Fraunhofer IAF



The application fields we address include

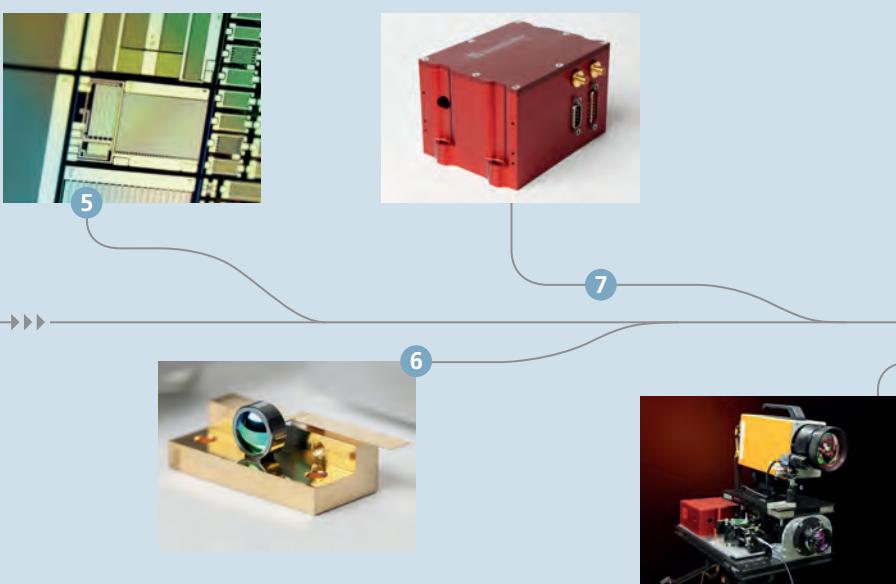
- 1** mobile and high-data-rate free-space communication,
- 2** energy-efficient electrical power conversion and lighting,
- 3** production control and process analytics, as well as
- 4** safety, security, and
- 5** space applications.

Anwendungsfelder sind **1** Mobilfunk und Freiraumkommunikation mit hohen Datenraten, **2** energieeffiziente Wandlung elektrischer Energie und energieeffiziente Beleuchtung, **3** Produktionskontrolle und Prozessanalytik sowie **4** Sicherheit, Schutz und **5** Raumfahrt.

Als eines der weltweit führenden Forschungszentren für Bauteile basierend auf III/V-Verbindungshalbleitern, bietet das Fraunhofer IAF mit seinen Forschungs- und Entwicklungsleistungen und seinen Technologien einen großen Mehrwert für ein breites Spektrum an Anwendungsfeldern. Dies spiegelt sich in der Bandbreite unserer Geschäftsfelder wider, in die wir unsere Angebote für Kunden und Partner gruppieren: Hochfrequenzelektronik — Leistungselektronik — Photodetektoren — Halbleiterlaser — Diamantbauelemente.

Die vom Fraunhofer IAF angebotenen F&E-Leistungen sind entlang unserer Wertschöpfungskette ausgerichtet. Sie reichen von reinen Beratungs- und Messleistungen sowie Entwürfen, bis hin zur Epitaxie von III/V-Halbleiter-Heterostrukturen, der Prozessierung von III/V-Wafern, vereinzelten elektronischen und optoelektronischen Bauteilen und Schaltungen bis hin zu aufgebauten und gehäussten Bauelementen.

Zudem bietet das Fraunhofer IAF kundenspezifische elektronische und optoelektronische Module und, in ausgewählten Fällen, auch Systemdemonstratoren an. Diese dienen zur Demonstration des Leistungspotentials der am IAF entwickelten Bauelemente, Schaltungen und Module in bestimmten Anwendungsszenarien, wie beispielsweise bei präzisen Abstandsmessungen in Stahlwerken oder für die berührungslose Detektion von Gefahrstoffen.



We take part in technology transfer initiatives, for example to provide our customers with the technology and processing expertise developed at Fraunhofer IAF. We can also set up extended prototype or small-series pilot production lines to supply certain quantities of epitaxy wafers, devices, circuits, and modules. To this end, Fraunhofer IAF is participating in the European MIRPHAB project, a pilot-line platform set up under the Horizon 2020 funding program for the production of mid-infrared photonic devices for chemical sensing and spectroscopic applications (www.mirphab.eu).

Our customers range from industry clients, which work with us either through direct research contracts or within the framework of public-funded collaborative research projects, to public authorities such as the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the European Commission, and the German Federal Ministry of Defense (BMVg) and its agencies.

RESEARCH FOR TODAY

In the following, we provide selected examples of our »Science for Customers« approach, starting with a lineup of high-TRL (technology readiness level) projects conducted in close cooperation with and on behalf of industry partners. The project results presented below include:

- millimeter-wave radar sensors for use in harsh environments in steelworks (p. 20)
- highly integrated 600 V-class electric-to-electric power converters for automotive and data centers (p. 24)
- tailored laser processing for the production of large-area LEDs (p.28)

Further examples include the setting up of an application lab to give partners and customers direct access to our latest IR laser-based sensing technologies and the construction of plasma reactors for the CVD growth of monocrystalline synthetic diamond for use by an industry partner.



Durch Technologietransfer können wir unseren Kunden das am Fraunhofer IAF entwickelte Know-How zur Technologie selbst und zur Weiterverarbeitung vermitteln. Im Rahmen eines ausgeweiteten Prototyps oder einer kleineren Serie einer Pilotlinienproduktion können wir die Epitaxie von Wafern, Bauteilen, Schaltungen und Modulen bis zu einer bestimmten Stückzahl anbieten. Zu diesem Zweck beteiligt sich das Fraunhofer IAF an der europäischen Initiative MIRPHAB: Das Pilotlinienprojekt wurde innerhalb des Horizon-2020-Finanzierungsprogramms gegründet und dient zur Herstellung photonischer Bauteile im mittleren Infrarot für die chemische Sensorik und spektroskopische Anwendungen (www.mirphab.eu).

Der Kreis unserer Kunden reicht von der Industrie, die mit uns entweder durch direkte Forschungsverträge oder im Rahmen öffentlich finanziert kollaborativer Forschungsprojekte zusammenarbeitet, bis hin zu öffentlichen Behörden, wie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Europäischen Kommission oder dem Bundesministerium für Verteidigung (BMVg) und seiner Dienststellen.

Technologien auf dem Weg in die Anwendung

In den folgenden Beiträgen werden wir ausgewählte Beispiele für unseren kundenorientierten Forschungsansatz vorstellen. Wir beginnen mit einer Zusammenstellung von Projekten mit hohen TRLs (technology readiness level), die mit und für Industriepartner durchgeführt wurden. Diese Projektergebnisse beinhalten

- Millimeterwellen-Radarsensoren für Anwendungen unter rauen Bedingungen in Stahlwerken (S. 20)
- Hochintegrierte 600 V-Spannungswandler für Automobil- und Rechenzentren (S. 24)
- Maßgeschneiderte Laserverarbeitung für die Herstellung großflächiger LEDs (S. 28)

Weitere Beispiele sind die Einrichtung eines Applikationslabors, welches unseren Kunden direkten Zugang zu unserer aktuellsten Infrarlaser-basierten Sensortechnologie bietet, sowie der Bau von Plasmareaktoren für das CVD-Wachstum von monokristallinem synthetischen Diamant für die Verwendung durch einen Industrikunden.

RESEARCH FOR TOMORROW

Fraunhofer IAF also works on lower TRL projects that are relevant for use in and commercialization by industry over a somewhat longer timescale. Examples presented below include:

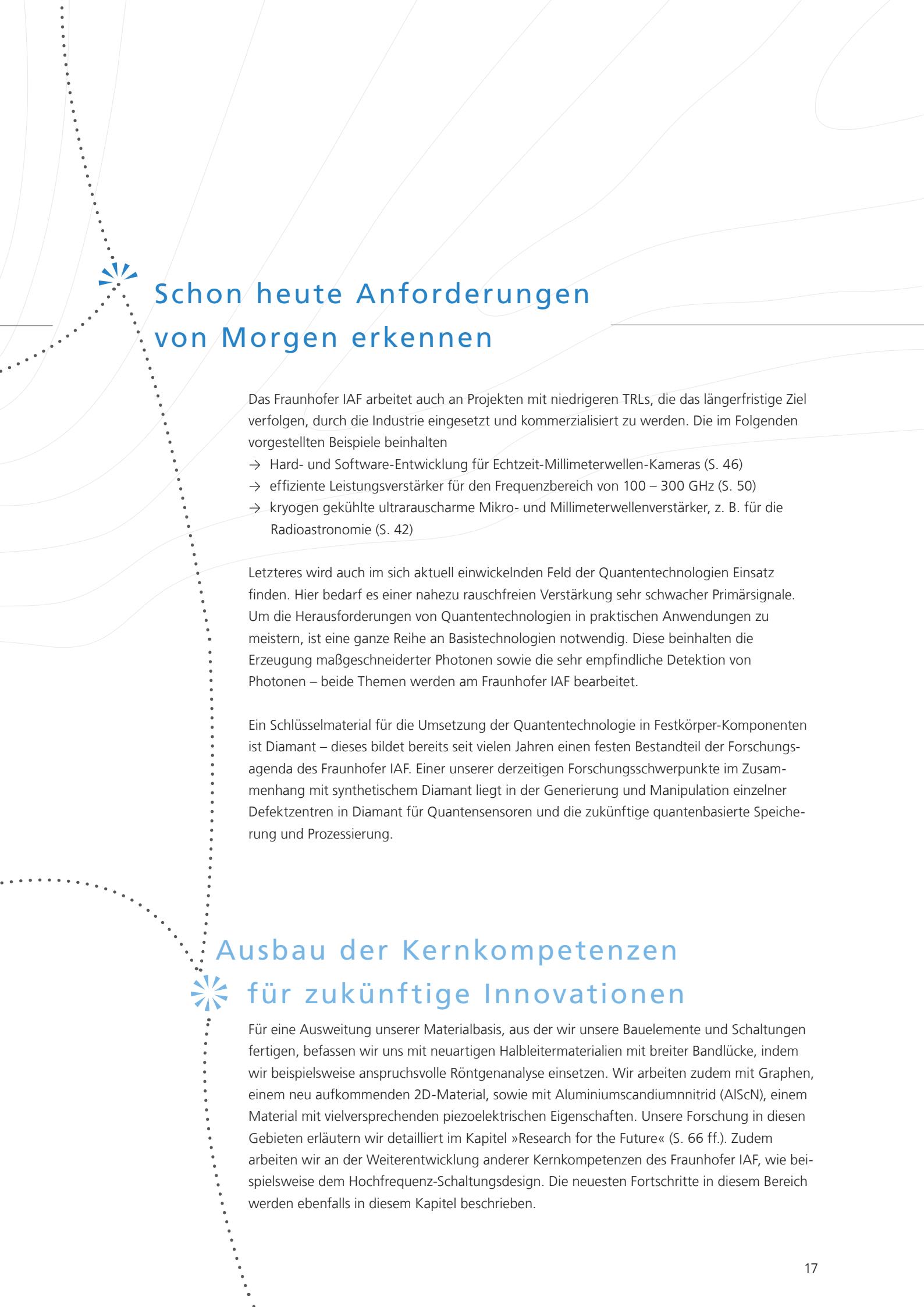
- hardware and software development for real-time millimeter-wave cameras (p. 46)
- efficient power amplifiers for the 100 – 300 GHz frequency band (p. 50)
- cryogenically cooled ultra-low-noise micro- and millimeter-wave amplifiers, e. g. for radio astronomy (p. 42)

The latter will also be used in the emerging field of quantum technologies, which requires the virtually noise-free amplification of very low primary signals. A wide range of enabling and supporting technologies are needed to meet the challenge of exploiting quantum technologies in real-world applications. This includes the generation of tailored photons and ultrasensitive photon detection, both of which are addressed by Fraunhofer IAF as detailed below.

A key material for implementing quantum technologies into solid-state devices is diamond. This material has already been on Fraunhofer IAF's research agenda for many years. One of our current development strands in synthetic diamond R&D is the generation and manipulation of single defect centers in diamond for quantum sensors and future quantum-based data storage and processing.

RESEARCH FOR THE FUTURE

To widen the base of materials used to build our devices and circuits, we research novel wide-bandgap semiconductor materials, employing sophisticated X-ray analyses, for example. We also work on graphene, an emerging 2D material, and aluminium scandium nitride, a material with promising piezoelectric properties. Our work in these fields is also presented in more detail in the chapter »Research for the Future« (pp. 66). In addition, we continue to develop Fraunhofer IAF's other core competencies, including radio frequency circuit design. Recent advances in this field are also outlined in this chapter.



Schon heute Anforderungen von Morgen erkennen

Das Fraunhofer IAF arbeitet auch an Projekten mit niedrigeren TRLs, die das längerfristige Ziel verfolgen, durch die Industrie eingesetzt und kommerzialisiert zu werden. Die im Folgenden vorgestellten Beispiele beinhalten

- Hard- und Software-Entwicklung für Echtzeit-Millimeterwellen-Kameras (S. 46)
- effiziente Leistungsverstärker für den Frequenzbereich von 100 – 300 GHz (S. 50)
- kryogen gekühlte ultrarauscharme Mikro- und Millimeterwellenverstärker, z. B. für die Radioastronomie (S. 42)

Letzteres wird auch im sich aktuell entwickelnden Feld der Quantentechnologien Einsatz finden. Hier bedarf es einer nahezu rauschfreien Verstärkung sehr schwacher Primärsignale. Um die Herausforderungen von Quantentechnologien in praktischen Anwendungen zu meistern, ist eine ganze Reihe an Basistechnologien notwendig. Diese beinhalten die Erzeugung maßgeschneideter Photonen sowie die sehr empfindliche Detektion von Photonen – beide Themen werden am Fraunhofer IAF bearbeitet.

Ein Schlüsselmaterial für die Umsetzung der Quantentechnologie in Festkörper-Komponenten ist Diamant – dieses bildet bereits seit vielen Jahren einen festen Bestandteil der Forschungsagenda des Fraunhofer IAF. Einer unserer derzeitigen Forschungsschwerpunkte im Zusammenhang mit synthetischem Diamant liegt in der Generierung und Manipulation einzelner Defektzentren in Diamant für Quantensensoren und die zukünftige quantenbasierte Speicherung und Prozessierung.

Ausbau der Kernkompetenzen für zukünftige Innovationen

Für eine Ausweitung unserer Materialbasis, aus der wir unsere Bauelemente und Schaltungen fertigen, befassen wir uns mit neuartigen Halbleitermaterialien mit breiter Bandlücke, indem wir beispielsweise anspruchsvolle Röntgenanalyse einsetzen. Wir arbeiten zudem mit Graphen, einem neu aufkommenden 2D-Material, sowie mit Aluminiumscandiumnitrid (AlScN), einem Material mit vielversprechenden piezoelektrischen Eigenschaften. Unsere Forschung in diesen Gebieten erläutern wir detailliert im Kapitel »Research for the Future« (S. 66 ff.). Zudem arbeiten wir an der Weiterentwicklung anderer Kernkompetenzen des Fraunhofer IAF, wie beispielsweise dem Hochfrequenz-Schaltungsdesign. Die neuesten Fortschritte in diesem Bereich werden ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben.



Research for Today

Technologien auf dem Weg in die Anwendung

Here we present a selection of R&D projects used to provide our partners and customers solutions that meet their specific needs and requirements. These solutions include millimeter-wave radar and mid-infrared optical sensors for use in demanding industrial applications, as well as highly integrated, efficient electrical power converters, tailored laser processes for producing large-area LEDs, and technologies for the construction and fabrication of customized plasma CVD reactors for growing monocrystalline diamond.

In anwendungsnahen Forschungs- und Entwicklungsprojekten erarbeiten wir für unsere Partner und Kunden spezifische Lösungen. Die Bandbreite reicht hier von Millimeterwellen-Radarmodulen und Mid-Infrarot-Lasern für die Sensorik über hoch-integrierte, effiziente elektrische Spannungswandler, Laserprozesse für die Herstellung großflächiger LED-Chips bis hin zur Entwicklung und Realisierung von Plasma-CVD-Anlagen für das Wachstum einkristalliner Diamantschichten.



20 MILLIMETER-WAVE STEELWORKS RADAR

Millimeterwellen-Radare für Stahlwerke

24 INTEGRATED GaN POWER CIRCUITS

Integrierte GaN-Leistungsschaltkreise

28 LASER4LEDs – TAILORED LASER PROCESSES FOR LARGE-AREA LEDs

Laser4LEDs – Maßgeschneiderte Laser-Prozesse für großflächige LEDs

32 INFRARED LASER APPLICATION LABORATORY

Applikationslabor für Infrarot-Laser

36 CVD REACTORS FOR DIAMOND GROWTH

CVD-Reaktoren für das Wachstum von Diamant



Millimeter-wave Steelworks Radar

Axel Hülsmann – axel.huelsmann@iaf.fraunhofer.de

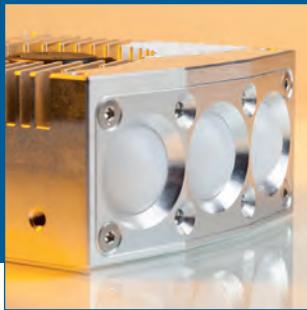
Due to the harsh environmental conditions at steelworks, sensors have to be extremely resistant to thermal radiation, lightning, dust, smoke, and steam. Optical, ultrasonic, or mechanical sensors fail or need extensive maintenance. Thanks to extensive research on high-frequency and mixed-signal devices, it is now possible to adopt cost-effective and highly accurate compact millimeter-wave (mmW) radar sensors in the steel industry. At a frequency of 100 GHz, millimeter waves behave quasi optically and components known from optics, such as waveguide fibers, flat and curved mirrors, and dielectric lenses, can be adopted for focused radar beam applications. The advantage of wavelengths more than 1000 times longer than light is their resistance to dust and aerosols.

1 Harsh environmental conditions at steelworks. *Raue Umgebungsbedingungen in Stahlwerken.*

The European steel industry is under high economic pressure and has shrunk significantly over the past few decades. Emerging markets like China, India, or Brazil penetrate the international steel market with cheap steel products made possible by lower labor costs, careless environmental pollution, and national subsidies. Germany's automobile industry depends on a reliable steel product supply chain and production expertise. To stop steel production from declining further in Europe, innovations must be implemented now. Automatization and rationalization processes must be improved to reduce overall production costs and enhance the quality of steel products like slabs, panels, and plates.

The Situation in the Steel Industry

Fraunhofer IAF is collaborating with several companies from the steel sector to develop new sensors based on millimeter-wave radars that fulfill the steel industry's special requirements. These sensors must be able to operate remotely, enable better production control, and reduce waste. Germany produces roughly 40 million tons of steel a year. The price of crude steel in Europe is about 500 € per ton. Currently each ton of crude steel produces 1.4 tons of CO₂. For example, a decrease in the actual offcut of a steel slab from 5 cm to 2.5 cm would save 500 kilotons of steel, 250 million €, and 700 kilotons of CO₂.



- **Millimeter-wave radar sensor**
- **Sensors for steelworks**
- **Harsh environmental sensors**
- **Distance and velocity measurements**

Millimeterwellen-Radare für Stahlwerke

250
nm/m

Measurement accuracy.

Messgenauigkeit.

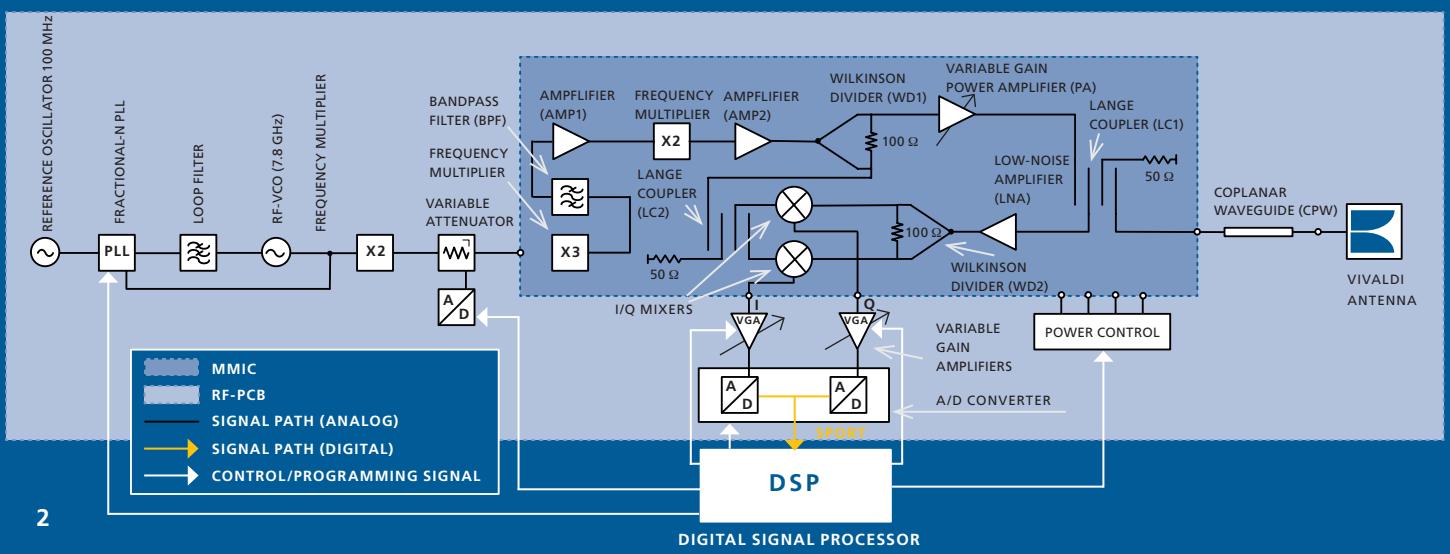
Aufgrund der rauen Bedingungen in Stahlwerken müssen Sensoren extrem unempfindlich gegenüber Hitze, Blitzlichtern, Staub, Rauch und Dampf sein. Optische, akustische und mechanische Sensoren sind ungeeignet oder brauchen erhebliche Wartung. Dank der Forschung an Hochfrequenz- und Mixed-Signal-Bauelementen ist der Einsatz von kosteneffizienten und hochgenauen, kompakten Millimeterwellen-Radar-Sensoren in der Stahlindustrie heute möglich. Bei Frequenzen um 100 GHz verhalten sich Millimeterwellen quasioptisch. Für fokussierte Radarstrahl-Anwendungen können daher Komponenten eingesetzt werden, die aus der Optik bekannt sind: Glasfasern, flache und gekrümmte Spiegel oder dielektrische Linsen. Der größte Vorteil einer Wellenlänge, die mehr als 1000 mal größer ist als die Lichtwellenlänge, ist die Unempfindlichkeit gegenüber Staub und Aerosolen.

Die Stahlindustrie in Europa ist unter hohem wirtschaftlichem Druck und über die letzten Jahrzehnte stark geschrumpft. Wegen geringer Lohnkosten, weniger strengen Umweltauflagen und nationalen Subventionen können Schwellenländer wie China, Indien oder Brasilien billige Stahlprodukte auf dem internationalen Markt anbieten. Insbesondere die deutsche Automobilindustrie ist jedoch auf eine hochwertige und zuverlässige Stahlversorgung und das Herstellungsfachwissen angewiesen. Um die Produktionskosten langfristig zu senken und die Qualität von Stahlprodukten, wie Brammen, Paneele und Blech zu verbessern, müssen die

Automations- und Rationalisierungsprozesse schnellstmöglich verbessert werden.

Die Situation der Stahlindustrie

Das Fraunhofer IAF arbeitet mit mehreren Unternehmen des Stahlsektors zusammen, um neuartige Sensoren auf der Basis von Millimeterwellen-Radaren zu entwickeln, die die besonderen Anforderungen der Stahlindustrie erfüllen. Die Sensoren müssen berührungslos arbeiten, eine bessere Produktionskontrolle ermöglichen und den Ausschuss von Schrott verringern. Deutschlands jährliche Stahlproduktion liegt bei 40 Millionen Tonnen. Der Rohstahlpreis liegt bei 500 € pro Tonne.



2

- 2 Block diagram of a 100 GHz broadband radar sensor.**
Blockschaltbild eines 100 GHz Breitband-Radar-Sensors.

Radar Sensor Development

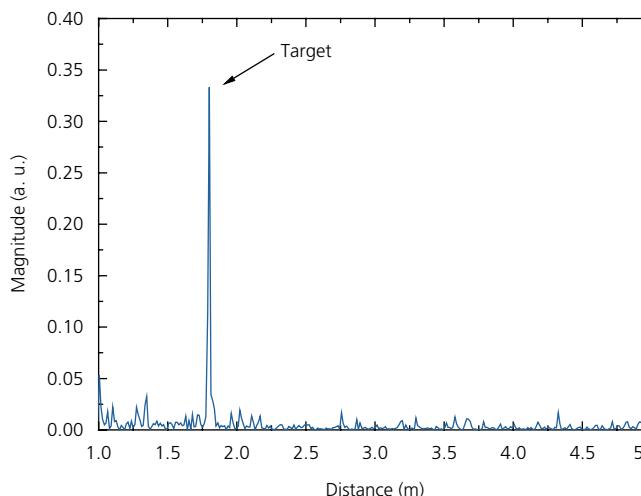
Fraunhofer IAF has developed a high-performance millimeter-wave radar system for harsh environments operating at W-band. This radar is based on a III/V-semiconductor front-end chip that includes a frequency multiplier,

power amplifier, low noise amplifier, and I/Q mixer. Using IAF's qualified 100 nm mHEMT process, this chip has a -3 dB bandwidth of 15 GHz and a noise figure of 6 dB and operates on one transmit/receive antenna port. The radar module can therefore be programmed to operate in the frequency range

of 250 nm/m under lab conditions. We developed a water-cooled housing and gas purge to fulfill the environmental requirements of heat radiation from liquid steel and to prevent dust particle accretion. The measurement spot size can be focused below 3 cm. The radar sensor includes a digital signal processor running a LINUX kernel. Robust signal processing algorithms have been developed to suppress clutter and noise, and to extract the distance-related information needed for precise process control. The radar system is ready for I4.0 applications, as the measurement data can be transferred via Ethernet.

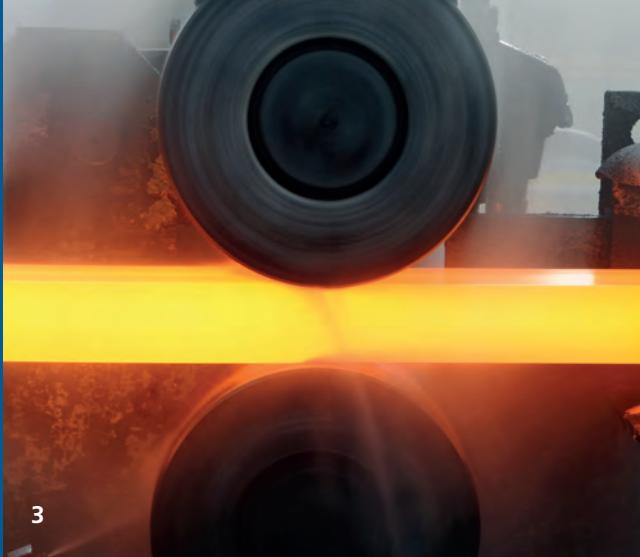
Summary

High-performance radars are needed for several areas of application at steelworks where other measurement techniques fail. The fluid level of molten steel can be measured with unbelievable accuracy. During steel slab production, radar border measurements can continuously monitor the casting process. Further applications during the panel sheet production process include the recording of red glowing plate thickness and positioning during the roller mill process.

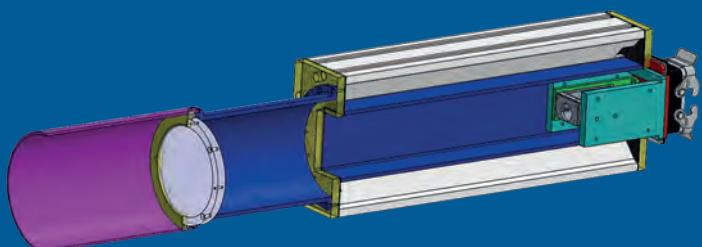


- 5 Measurement example of a 2 cm sphere at a distance of 1.8 m on a concrete floor.**
Beispiel: Detektion einer 2 cm Kugel auf Betonboden im Abstand von 1,8 m.

between 92 and 100 GHz by a test radio license. Resolution, sensitivity, and robustness are much better than in radar systems based on silicon, which is essential for use in steelworks. Chirp generation uses a TCXO-based fractional-N PLL, which results in an accuracy



3



4

- 3 Roller mill environment.**
Walzstraßenumgebung.

- 4 Cross section of a focusing radar for harsh environments.**
Querschnitt eines fokussierenden Radars für rau Umgebungen.

Zurzeit erzeugt jede Tonne Rohstahl ca. 1,4 Tonnen CO₂. Allein die Reduzierung der Randtoleranz einer Bramme von zurzeit 5 cm auf 2,5 cm führt zu einer Ersparnis von 500 Kilotonnen Stahl, 250 Mio € und 700 Kilotonnen CO₂.

Radar-Sensor-Entwicklung

Das Fraunhofer IAF hat ein hoch performantes Millimeterwellen-Radarsystem für rau Umgebungen entwickelt, das im W-Band (75 – 110 GHz) arbeitet. Dieses Radar basiert auf einem III/V-Halbleiter-Frontend-Chip, der einen Frequenzvervielfacher, Leistungsverstärker, rauscharmen Eingangsverstärker und I/Q-Mischer integriert. Der Chip wurde mit dem IAF-eigenen 100 nm mHEMT-Prozess realisiert und hat eine -3 dB Bandbreite von 15 GHz, eine Rauschzahl von 6 dB und arbeitet mit nur einem Antennen-Port für Senden und Empfangen. Das Radar-Modul kann per Software so programmiert werden, dass es im legalen Frequenzbereich zwischen 92 GHz und 100 GHz unter Beantragung einer Versuchsfunklizenz betrieben werden kann. Auflösung, Empfindlichkeit und Robustheit sind deutlich besser als Radar-Systeme, die auf Siliziumschaltkreisen basieren, was entscheidend für Anwendungen in Stahlwerken ist. Die lineare Frequenzmodulation basiert auf einem temperaturkompensierten Quarzoszillator (TCXO), der die Referenz einer mehrfachfraktionellen Phasenregelschleife (PLL) ist und zu einer Genauigkeit von 250 nm/m unter

Laborbedingungen führt. Außerdem hat das Fraunhofer IAF ein wassergekühltes Gehäuse mit Gas-Spülung entwickelt, um den Umgebungsanforderungen im Stahlwerk und der Hitzestrahlung von flüssigem Stahl gerecht zu werden. Dadurch können Partikelanhäufungen verhindert werden. Der mmW-Messfleckdurchmesser kann auf unter 3 cm fokussiert werden. Der Radar-Sensor enthält einen digitalen Signalprozessor, auf dem ein LINUX-Kernel läuft. Zudem wurden robuste Signalverarbeitungsalgorithmen entwickelt, um Stördaten und Rauschen zu unterdrücken und die Entfernungsinformationen zu extrahieren, welche für eine präzise Prozesskontrolle benötigt werden. Das Radarsystem ist außerdem Industrie 4.0-kompatibel, da die Messdaten per Ethernet übertragen werden.

Resümee

Es gibt mehrere Anwendungen im Stahlwerk, bei denen hoch-performante Radare gebraucht werden, da andere Messtechniken hier an ihre Grenzen stoßen. So kann heute dank innovativer Radar-Technologie der Füllstand von flüssigem Stahl mit größter Präzision gemessen und bei der Brammenherstellung der Gießprozess überwacht werden. Im Walzwerk sind kontinuierliche Messungen der Dicke von rot glühendem Blech möglich. Auch eine Überwachung der Position des Blechs während des Walzprozesses ist realisierbar.

4.0

Ready for I 4.0 thanks to
Ethernet data transfer.
Geeignet für Industrie 4.0
dank Ethernet-Datentransfer.



Integrated GaN Power Circuits

Richard Reiner – richard.reiner@iaf.fraunhofer.de

Integrated power circuits based on our AlGaN/GaN heterojunction technology using large-diameter, low-cost Si carrier substrates feature high functionality and outstanding performance. These circuits pave the way for a new generation of power electronics. Fraunhofer IAF offers customizable 600 V class GaN devices and circuits for highly efficient high-frequency voltage converters, such as those used in data centers and for highly compact automotive applications.

- 1 *In data centers GaN voltage converters increase the energy efficiency significantly.*

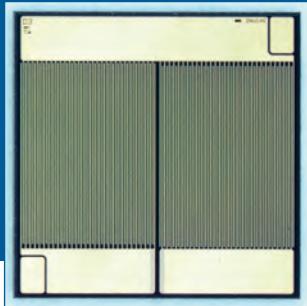
In Rechenzentren erhöhen GaN-Spannungswandler die Energieeffizienz erheblich.

Advanced approaches to reducing losses in energy conversion are required for more sustainable use of precious energy sources. In this context, electric power is one of the most valuable and versatile forms of energy, and power electronics is the technology that makes this possible. Fraunhofer IAF develops highly efficient power transistors and circuits based on an AlGaN/GaN heterojunction technology using large-diameter, low-cost Si carrier substrates. These devices feature very low conduction and switching losses, and pave the way for a new generation of more compact and efficient power electronics. Highly efficient GaN-based power devices can lead to significantly lower losses in voltage converters for data centers. But due to monolithically integrated GaN circuits, this technology is just as groundbreaking for high-frequency voltage converters in automotive applications.

Improved Functionality Thanks to New Approaches to Integration

Unlike most conventional power technologies, such as Power MOSFETs or IGBTs, lateral GaN-on-Si heterojunction technology allows for the integration of several components side-by-side on a single chip. Thus monolithic integration of power circuits improves functionality and performance thanks to lower parasitics, and reduces the effort expended on assembly and connection technologies.

Over the past year our institute has presented a number of highly integrated GaN-based power circuits that rely on monolithic integration to achieve advanced performance. The monolithic co-integration of a gate driver and power HEMT reduces the gate loop inductance and minimizes disturbances caused by drain-gate coupling, thereby achieving very fast slew rates with values up



- High-frequency
- High-voltage
- Highly efficient
- Monolithic half bridge
- Highly compact

Integrierte GaN-Leistungsschaltkreise

Integrierte GaN-Leistungsschaltkreise in der AlGaN/GaN-Hetero-Junction-Technologie auf großflächigen, kostengünstigen Si-Trägersubstraten zeichnen sich durch hohe Funktionalität und hohe Leistungsfähigkeit aus. Diese Schaltkreise ermöglichen eine neue Generation von Leistungselektronik. Das Fraunhofer IAF bietet kundenspezifische 600 V GaN-Bauelemente und GaN-Schaltkreise für hocheffiziente Hochfrequenzspannungswandler an, wie sie für Server- und hochkomakte Automobilanwendungen benötigt werden.

250
V/ns

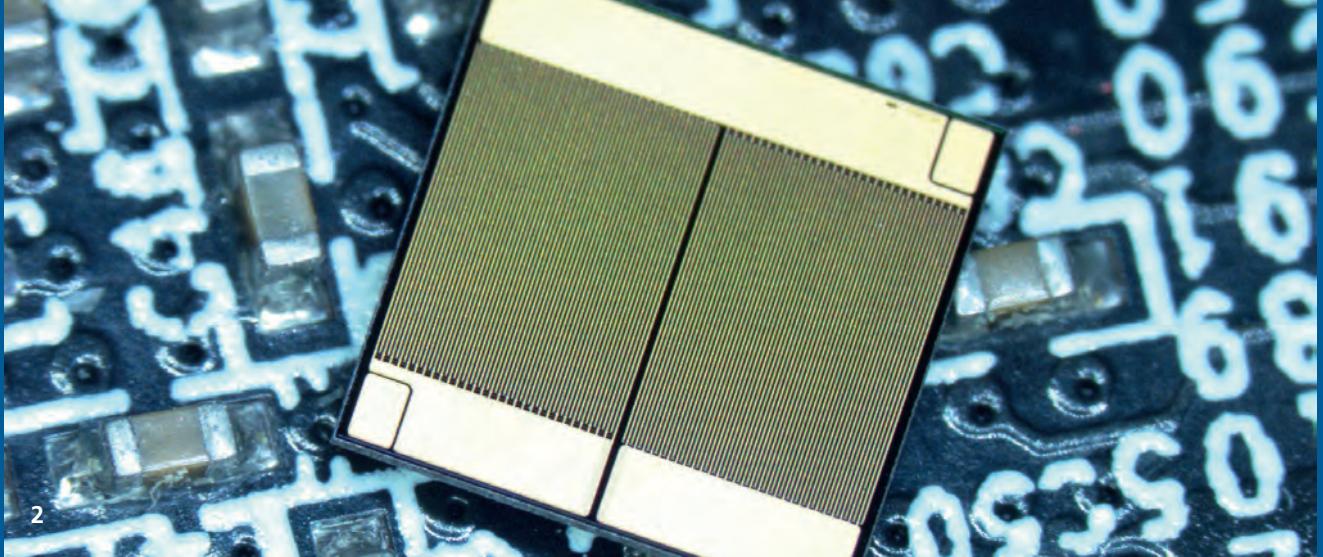
Very steep switching edges during turn-on and turn-off.
Sehr steile Schaltflanken während des Ein- und Ausschaltens.

Zur Reduktion von Verlusten bei der Energiewandlung werden neue Ansätze benötigt, um die verbleibenden Energiressourcen nachhaltig zu nutzen. GaN-Leistungselektronik hilft elektrische Energie effizienter zu nutzen. Am Fraunhofer IAF werden hierzu hocheffiziente Leistungstransistoren und Schaltkreise auf großflächigen, kostengünstigen Si-Trägersubstraten entwickelt, basierend auf unserer AlGaN/GaN-Hetero-Junction-Technologie. Diese Bauelemente erzeugen kleine Leitungs- und Schaltverluste und ermöglichen eine neue Generation kompakter und effizienter Leistungselektronik. Die hocheffizienten GaN-basierten Leistungshalbleiter können die Verluste in Spannungswandlern in sogenannten »Data-Centern« erheblich reduzieren. Auch im Automobilbereich sparen die hochkomakten und hochfrequenten Spannungswandler aufgrund ihrer monolithisch integrierten GaN-Schaltkreise Energie.

Höhere Funktionalität durch neue Ansätze der Integration

Im Gegensatz zu den meisten konventionellen Leistungstechnologien, wie Power-MOSFETs oder IGBTs, erlaubt die laterale GaN-auf-Si Hetero-Junction-Technologie die Integration mehrerer Komponenten nebeneinander auf einen Chip. Im Vergleich zu Einzelbauelementen werden durch die monolithische Integration eines Leistungsschaltkreises die Funktionalität und die Leistungsfähigkeit erhöht, bei gleichzeitiger Reduzierung des Aufwands in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Im vergangenen Jahr hat unser Institut eine Reihe von leistungsstarken, hochintegrierten GaN-basierten Leistungsschaltkreisen vorgestellt.

Die monolithische Kointegration eines Gatetreibers und Leistungs-HEMT reduziert sowohl die Gateschleifeninduktivität als auch



2 Monolithically integrated GaN half bridge.

Monolithisch integrierte GaN-Halbbrücke.

to 250 V/ns during turn-on and turn-off transitions. The measurements were performed at an off-state voltage of $V_{DS} = 450$ V and an on-state current of $I_D = 14$ A.

GaN's high chemical bond strength allows for operation at high temperatures and reduces the effort required for cooling. Nonetheless,

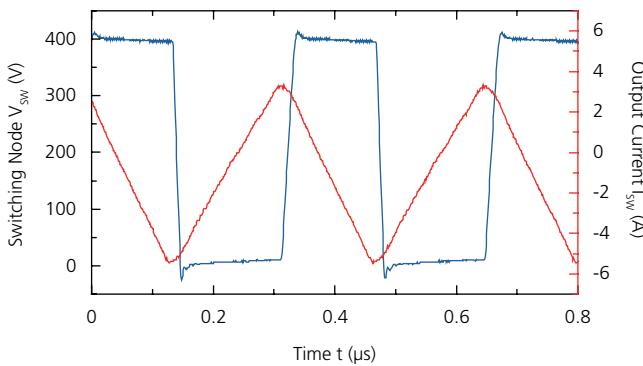
device performance and reliability suffer under these conditions. Thus a highly linear, fast response temperature sensor was monolithically integrated in a 600 V/30 A power HEMT to monitor the temperature and to control

The monolithic integration of this topology can be used in various power applications. It features better switching performance due to reduced parasitics, improved circuit reliability, and lower assembly costs. Fraunhofer IAF has developed the world's first monolithic 600 V class half-bridge circuit with integrated free-wheeling diodes. Operation of the half-bridge chip has been demonstrated in a soft-switching buck converter at switching frequency of 3 MHz, input voltages of up to 400 V, and output power of up to 250 W.

Advanced Technology is Our Foundation

The keys for developing and fabricating integrated power circuits are high-quality GaN materials and sophisticated process technology. Our 600 V class GaN-on-Si device technology is based on the heteroepitaxial growth of III-nitride layers using metal-organic chemical vapor deposition on 4" and 8" Si substrates. These structures feature high isolation and low defect density in order to achieve high breakdown voltages up to 1000 V.

Fraunhofer IAF fabricates high-voltage devices and circuits in our III-V processing line, thereby providing customized solutions for various power applications with our advanced high-voltage GaN-on-Si technology.



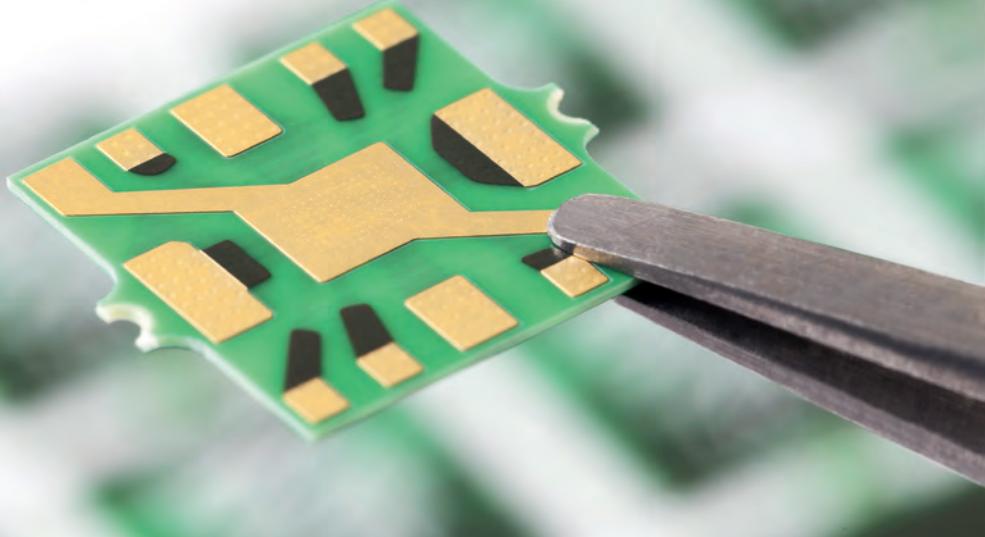
3 Switching node voltage and current of an integrated half bridge as 400 V to 200 V buck converter at 3 MHz switching frequency.

Schaltspannung und Strom einer integrierten Halbbrücke als 400 V zu 200 V Abwärtswandler mit 3 MHz Schaltfrequenz.

operating conditions in accordance with the application's requirements. The ideal supplement to our highly functional monolithically integrated power circuits is an embedded component packaging (ECP) technology. The advantages of the compact and highly functional assembly technology are demonstrated by our monolithically integrated GaN multilevel inverter chip, which is embedded in the AT&S ECP packaging technology (Fig. 4).

First Integrated High-Voltage Half Bridge

The core topology in most converter applications is a half-bridge circuit, which consists of two transistors and two reverse diodes.



4 Monolithically integrated GaN multilevel inverter chip embedded in the AT&S ECP packaging technology.
Monolithisch integrierter GaN-Multilevel-Inverterchip eingebettet in einem AT&S ECP-Package.

die Drain-Gate-Kopplung. Damit können sehr hohe Ein- und Ausschaltflanken mit Werten bis zu 250 V/ns erreicht werden. Die Messungen wurden mit einer Sperrspannung von $V_{DS} = 450$ V und einem Durchlassstrom von $I_D = 14$ A durchgeführt.

Die starke chemische Bindung von GaN ermöglicht den Betrieb bei hohen Temperaturen und reduziert den Aufwand für die Kühlung. Dennoch leiden Leistungsfähigkeit und Bauteilzuverlässigkeit unter diesen Bedingungen. Das Fraunhofer IAF demonstrierte einen hochlinearen, schnellen Temperatursensor in einem 600 V/30 A Power-HEMT. Damit kann man die aktuelle Temperatur des Bauelements bestimmen und es je nach Anforderung der Anwendung in seinem optimalen Arbeitsbereich regeln. Die ideale Ergänzung zu unseren hoch-funktionalen monolithisch integrierten Leistungsschaltkreisen ist die sogenannte »Embedding Component Packaging« (ECP) Gehäusetechnologie. Die Vorteile dieser kompakten Aufbautechnik mit hoher Funktionalität wird an unserem monolithisch integrierten GaN-Multilevel-Inverter demonstriert, der in einer solchen AT&S ECP-Technologie eingebettet ist (Abb. 4).

High-frequency converter at operating voltage of up to 400 V.

Hochfrequenz-Wandler bei Betriebsspannungen bis zu 400 V.

3 MHz

Halbbrücken-Chip in den verschiedensten Leistungsanwendungen eingesetzt werden. Durch monolithische Integration erreicht die Schaltung ein besseres Schaltverhalten, eine erhöhte Zuverlässigkeit und kleinere Herstellungskosten für die Aufbau- und Verbindungstechnik. Das Fraunhofer IAF hat die weltweit erste monolithisch integrierte Halbrücke mit integrierten Freilaufdioden der 600 V-Klasse entwickelt. Der Betrieb wurde in einem wechselnden Abwärtswandler bei einer Schaltfrequenz von 3 MHz, einer Eingangsspannung von 400 V und einer Ausgangsleistung bis zu 250 W demonstriert.

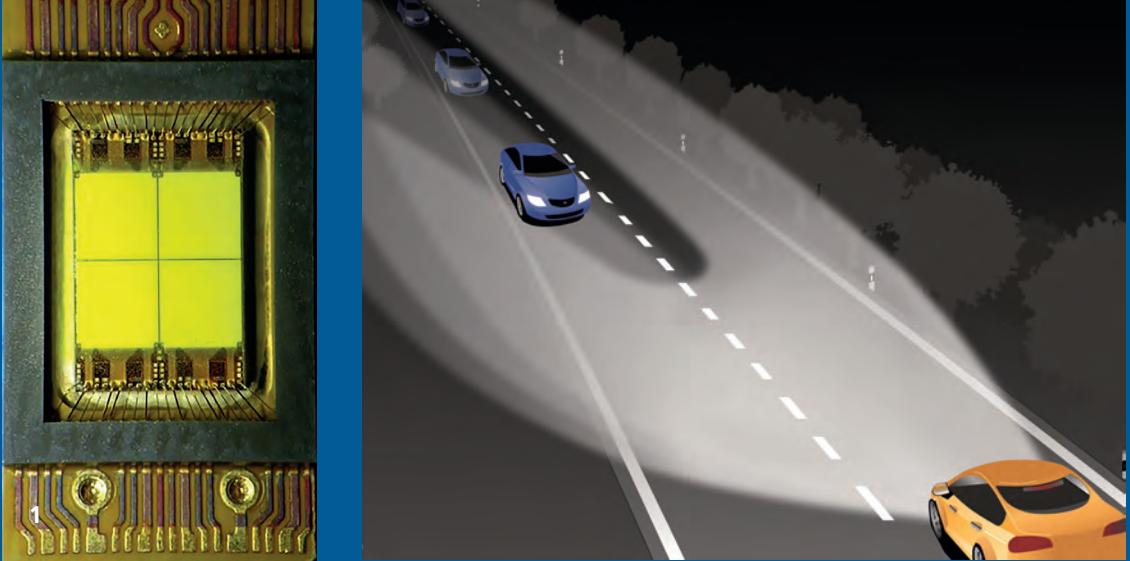
Die fortschrittliche Technologie ist unsere Basis

Die Grundlagen für die Entwicklung und die Fertigung von integrierten Leistungsschaltkreisen sind eine hohe Materialqualität und eine hochentwickelte Prozesstechnologie. Unsere GaN-auf-Si-Technologie der 600 V-Klasse basiert auf dem Heteroepitaxiewachstum von III-Nitrid-Schichten durch Metallorganische chemische Dampfphasenabscheidung auf 4" und 8" Si-Substraten. Diese Strukturen besitzen eine hohe Isolation und kleine Defektdichten, damit Sperrspannungen von bis zu 1000 V erzielt werden können.

Das Fraunhofer IAF bietet für viele Anwendungen Leistungsbaulemente und -schaltungen in unserer III-V-Prozesslinie sowie kundenspezifische Lösungen in der Hochvolt GaN-auf-Si-Technologie (600 V-Klasse).

Erste monolithisch integrierte Hochvolt-Halbbrücke

Die dominierende Topologie in den meisten Wandleranwendungen ist die Halbbrücke, die aus zwei Transistoren und zwei Freilaufdioden besteht. Damit kann ein monolithischer



Laser4LEDs – Tailored Laser Processes for Large-area LEDs

Michael Kunzer, Thorsten Passow – michael.kunzer@iaf.fraunhofer.de

Innovative LED applications demand increasing LED light output and chip sizes. As with all large-area devices, the device yield drops the greater the chip size. Fraunhofer IAF has developed a novel laser micro-defect repair technique for large-area LED chips that can repair micro-defects during LED production, thereby increasing the manufacturing yield of large-area LED devices.

1 Application example: Large 1024 pixel LED chips as required for novel adaptive car headlights.

Anwendungsbeispiel: Große LED-Chips mit 1024 Pixeln wie sie für adaptive KFZ-Fahrlichter benötigt werden.

With novel and ever more demanding applications, the LED industry has been following a trend towards more efficient, longer-lasting and increasingly powerful LEDs. This can be achieved by increasing LED chip size and by lowering the current density. New innovative applications also require larger chip sizes for new functionalities as well as for higher electrical and optical power per chip. Novel adaptive car front-light systems (μ AFS), for example, use large-sized LED chips ($4 \times 4 \text{ mm}^2$) containing a matrix of 1024 individually addressable LED pixels instead of a multitude of individual LED chips combined on a board (Fig. 1, left). This enables a much higher resolution and increased functionality, such as flexible headlight illumination patterns, capable of adapting to changing road and traffic conditions (Fig. 1, right). Increasing chip sizes, however, offer more room and increase the likelihood of defects arising. Due

to the use of foreign substrates in III-nitride epitaxy, the defect density during growth and processing cannot be reduced to a level comparable to silicon-based devices. As a result, the risk of defect-related disturbances in the properties of an LED or even a complete failure of a pixel within a pixel matrix rises significantly the greater the chip area size. Fig. 2 shows simulated device yields for increasing chip size at a constant defect density. At chip sizes of $4 \times 4 \text{ mm}^2$, device yield can drop below a level reasonable for production.

Laser direct-writing techniques for the repair of large-area devices have already been established in Si-based DRAMs, lithographic masks, color filters, and TFT display production. The laser-based defect repair of LED chips during the manufacturing process is a promising approach for enabling the defect-free production of large-sized LED chips



- **UV laser ablation**
- **μ -defect repair**
- **Large LED chips**
- **Optimized device yield**

Laser4LEDs – Maßgeschneiderte Laser-Prozesse für großflächige LEDs

Innovative LED-Anwendungen erfordern eine stetige Zunahme der LED-Lichtleistungen und Chip-Größe. Typischerweise sinkt die Herstellungsausbeute mit zunehmender Chip-Größe. Am Fraunhofer IAF wurde ein neuartiges Laser-basiertes Reparaturverfahren entwickelt, das Mikrodefekte während der LED-Herstellung eliminiert und so die Ausbeute von großflächigen LEDs steigert.

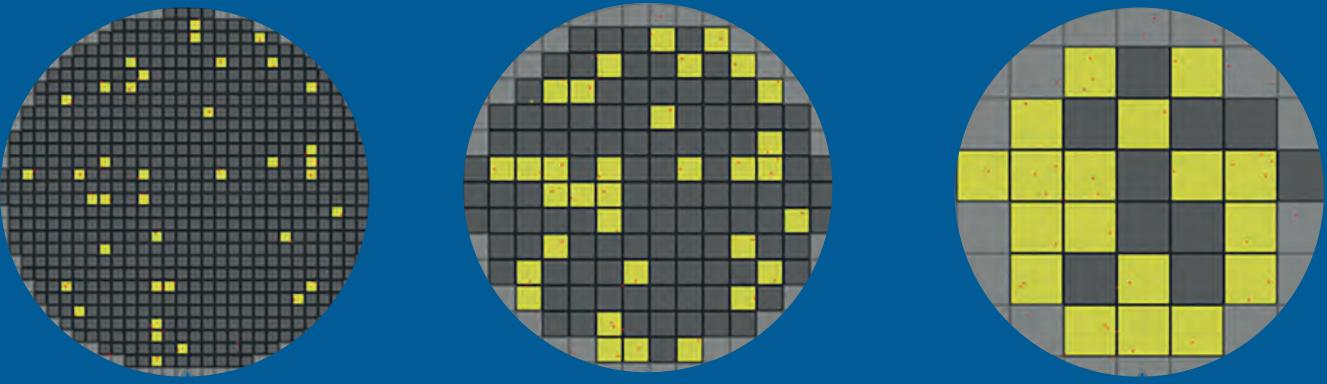
1,000,000x

*Reduction of reverse
leakage current.*

Reduktion des Rückwärtsstroms.

Mit neuartigen und immer anspruchsvolleren Anwendungen folgt die LED-Industrie einem Trend hin zu robusteren, langlebigeren und immer leistungsfähigeren LEDs. Dies lässt sich durch Senken der Stromdichte mit zunehmender Chipfläche erzielen. Aber auch neue innovative Anwendungen benötigen größere LED-Chips, die eine gesteigerte elektrische und optische Leistungsfähigkeit pro Chip ermöglichen. Im neuen μ -adaptiven Automobil-Scheinwerfersystem (μ AFS) kommen beispielsweise großflächige Chips zum Einsatz, die aus einer Matrix mit 1024 LED-Pixeln, statt aus einzelnen, individuell steuerbaren LED-Chips auf einer Platine bestehen (Abb. 1, links). Dies ermöglicht eine erheblich höhere Auflösung und gesteigerte Funktionalität wie eine flexible, sich an verändernde Straßen- und Verkehrsbedingungen anpassende Leuchtverteilung (Abb. 1, rechts). Eine zunehmende Chipgröße erhöht jedoch

die Wahrscheinlichkeit von Defekten erheblich und damit das Risiko für defekt-basierte Störungen einer LED oder gar für das Versagen eines ganzen Pixels innerhalb einer Pixel-Matrix. Da bei der III-Nitride-Epitaxie Fremdsubstrate verwendet werden müssen, lässt sich die Defektdichte bei Wachstum und Prozesstechnik nicht auf ein von Siliziumbauteilen bekanntes Niveau absenken. Daher steigt das Risiko für defekt-basierte Störungen mit zunehmender Chip-Fläche massiv an. In Abb. 2 sind die Ergebnisse von Simulationen der Bauteilausbeute mit zunehmender Chip-Größe bei fester Defektdichte dargestellt. Bei einer Chip-Abmessung von $4 \times 4 \text{ mm}^2$ sinkt die Bauteilausbeute unter einen für die Produktion sinnvollen Wert. Direktschreibende Laserverfahren zur Reparatur großflächiger Bauteile sind bereits bei der Produktion von Silizium-DRAMs, Lithographiemasken, Farbfiltermatrizen und TFT-Displays etabliert.



2

- 2 Simulated device yields for increasing LED chip sizes (1, 2, 4 mm²) at a constant defect density (defect devices are indicated as yellow squares).**

Simulierte Bauteilausbeute für LED-Chips mit zunehmender Größe (1, 2, 4 mm²) bei konstanter Defektdichte (gelbe defekte Bauelemente).

and LED arrays with individually controllable pixels. The need to identify microscopic areas containing localized defects and remove or electrically isolate them without creating new leakage current paths presents a particular challenge when repairing defects. To overcome this challenge, Fraunhofer IAF has developed a novel technique to repair defects in III-N based LEDs through the use of ultraviolet laser micromachining. This technique builds on our experience of successfully using laser to make GaN LEDs. These activities were funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the

μAFS project, which was conducted in close cooperation with the industry partners Osram, Infineon, Hella, and Daimler.

Precise and Careful UV Laser μ-Defect Repair

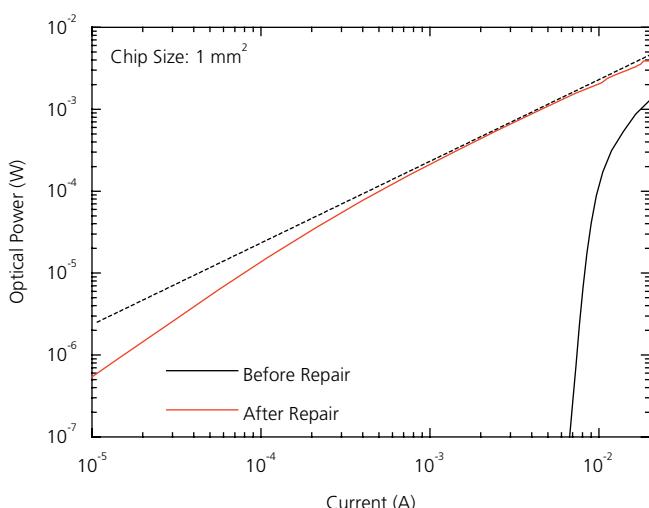
Laser micromachining is a highly flexible direct-writing approach that enables

electrically active defects in LED chips to be gently repaired during the manufacturing process. A UV laser is utilized to precisely remove μ-defects or to write a trench to electrically isolate defects from the current path by means of gentle semiconductor material ablation. This requires profound knowledge and precise control of both the relevant laser parameters, such as pulse energy, pulse

length, and wavelength, as well as the ablation rate of the semiconductor material. Typically, P-I and I-V characteristics of defective LEDs can be improved to a level at which significant leakage current can no longer be observed following proper laser treatment of the defect. Additionally, the occurrence of dark areas in luminance distribution images around local defects, caused by current paths with lower resistance than the p-n junction, can be significantly reduced by removing or electrically isolating the local defect using ultraviolet laser micromachining. Even the luminance distribution images at low current densities are homogeneous after laser treatment (Fig. 4). Furthermore, the threshold current of the light-output characteristics can be reduced by several orders in magnitude due to the removal of local non-radiative leakage paths (Fig. 3). Ultraviolet laser micromachining is therefore suitable for repairing defects in large-size LED chips and LED pixel arrays, enabling LED manufacturers to make significant progress in the improvement of efficient LED chips for manifold applications.

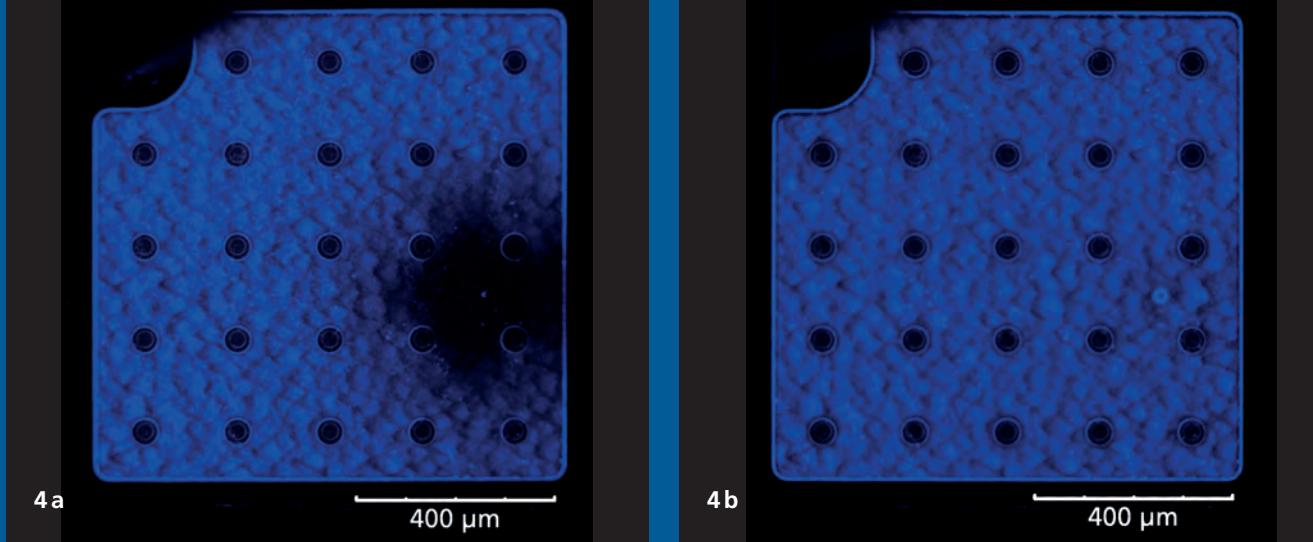
Fields of Application

This ultraviolet laser micromachining of LEDs method is suitable for repairing defects in large-sized LED chips with lateral or vertical current flow design. This can reduce the percentage of defective chips, increase the yield, and lower the production costs. In addition, the proposed method prolongs the average LED lifetime, thereby increasing customer satisfaction and reducing the time spent replacing parts in final applications.



- 3 Light output power vs. drive current of power LED before and after laser-based defect treatment.**

Lichtleistungs-Strom-Kennlinie einer Power-LED vor und nach der Laser-Mikro-Defektbehandlung.



4 LED chip before (a) and after laser-based micro-repair (b).

Dünnschicht-Power-LED-Chip vor (a) und nach der Laser Mikro-Defektbehandlung (b).

Die laserbasierte Reparatur von Defekten in LED-Chips während des Herstellungsprozesses bietet einen vielversprechenden Ansatz für die defektfreie Herstellung großflächiger LED-Chips und LED-Felder mit individuell steuerbaren Pixeln. Die Herausforderung der Defektreparatur besteht darin, die mikroskopischen Bereiche, die Defekte enthalten, zu identifizieren und diese zu entfernen oder lokal elektrisch zu isolieren, ohne durch die Laserbearbeitung neue Leckstrom-Pfade zu verursachen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde am Fraunhofer IAF eine neue Technologie zur Reparatur von Defekten mittels ultravioletter Lasermikrobearbeitung entwickelt, bei der wir auf unserer Erfahrung der erfolgreichen Herstellung von laserprozessierten GaN-basierten LEDs aufbauen. Diese Entwicklung entstand in enger Kooperation mit den Industriepartnern Osram, Infineon, Hella und Daimler und wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts μ AFS gefördert.

1000X

Reduction in light threshold current after laser μ -defect treatment.

Abnahme des Schwellstroms für Lichteinsatz durch Laser- μ -Defektbehandlung.

Präzise und schonende UV-Laser-basierte μ -Defekt-Reparatur

Lasermikrobearbeitung ist ein hochflexibles, direktes Schreibverfahren, welches die schonende Reparatur von Defekten in LED-Chips während des laufenden Herstellungsprozesses ermöglicht. Ein UV-Laser wird eingesetzt, um durch behutsame Materialabtragung den Defekt zu entfernen oder mittels Erzeugung eines mikroskopischen Grabens elektrisch zu isolieren. Dafür bedarf es einer fundierten Kenntnis der Laserparameter,

wie der Pulsennergie, der Pulslänge und der Wellenlänge, sowie der Abtragungsrate des Halbleitermaterials. Typischerweise können P-I- und I-V-Eigenschaften fehlerhafter LEDs nach einer Laserbearbeitung des Defekts soweit verbessert werden, dass kein nennenswerter Leckstrom mehr auftritt. Auch das Auftreten dunkler Bereiche im Leuchtbild ringsum lokaler Defekte, welche durch Strompfade mit niedrigerem Widerstand als beim p-n-Übergang entstehen, kann erheblich verringert werden, indem lokale Defekte durch ultraviolette Lasermikrobearbeitung entfernt oder elektrisch isoliert werden. Selbst die Leuchtbilder bei niedrigen Stromdichten erscheinen nach der Laserbearbeitung homogen (Abb. 4). Weiterhin lässt sich der Einsatz in der Licht-Strom-Charakteristik durch die Entfernung lokaler nicht-strahlender Nebenschlüsse um mehrere Größenordnungen reduzieren (Abb. 3). Daher eignet sich die ultraviolette Lasermikrobearbeitung für die Reparatur von Defekten in großflächigen LED-Chips oder LED-Matrizen.

Anwendungsbereiche

Das am Fraunhofer IAF entwickelte Verfahren zur ultravioletten Lasermikrobearbeitung von LEDs eignet sich für die Reparatur von Defekten in großflächigen LED-Chips mit lateralem oder vertikalem Stromfluss. Dadurch können defekte Chips reduziert werden, die Ausbeute erhöht, die Lebensdauer verlängert und Produktionskosten verringert werden.



Infrared Laser Application Laboratory

Jan-Philip Jarvis – jan-philip.jarvis@iaf.fraunhofer.de

Tunable mid-infrared quantum cascade lasers (QCL) have emerged as powerful and versatile light sources for many spectroscopic applications. QCLs have now reached a level of technological maturity that allows for commercial deployment. The infrared application laboratory at Fraunhofer IAF aims to bridge the gap between laser source and measurement system development at Fraunhofer IAF and potential customers and end users. It acts as a showroom where novel QCL-based technologies are both demonstrated and made accessible to partners from industry for evaluation and contract measurements.

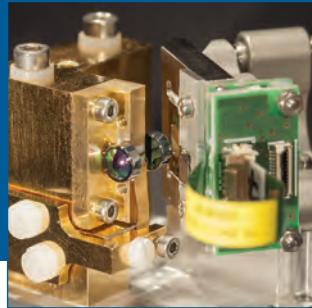
- 1 MOEMS EC-QCL enables real time MIR spectroscopy for application in industrial process analytical technology and production monitoring.**
Der MOEMS EC-QCL ermöglicht die Anwendung von echtzeitfähigiger MIR Spektroskopie in der industriellen Prozessanalytik und der Kontrolle von Produktionsprozessen.

The mid-infrared (MIR) spectral range is considered the molecular fingerprint region of the electromagnetic spectrum, as many chemical compounds show strong and highly characteristic absorption features at this range that can be used for analysis and identification. The observed absorption features provide information about both composition and type of molecular bonding. Quantum cascade lasers (QCLs) comprise a versatile light source with high potential for use in novel MIR spectroscopic measurement techniques, as they combine a broad spectral tuning range of more than hundreds of wave-numbers with high spectral brightness. QCL-based measurement techniques have proven potential to outperform conventional spectroscopy techniques like FTIR spectroscopy in

several applications, especially when measurement speed or high spectral brightness is of key importance. The technological maturity of QCL-based spectroscopy devices has recently reached a level that allows for such systems to be used commercially. Nevertheless, potential industrial end users are still deterred by cost-related issues and the outstanding need for development. Three QCL-based spectroscopy setups can be found in the application laboratory.

Real-time Spectroscopy

Legal restrictions and increasing consumer expectations put strong pressure on industry to ensure the quality of food or pharmaceutical products. Therefore there is a growing demand for a continuously online monitoring



- Infrared spectroscopy using quantum cascade lasers
- Contactless real-time analysis of solids and liquids
- Spot and image detection
- Industrial process control
- Chemical analysis

Applikationslabor für Infrarot-Laser

In vielen Spektroskopie-Anwendungen haben sich durchstimmbare Quantenkaskadenlaser bereits als vielseitige und leistungsfähige Lichtquellen im mittleren Infrarotbereich gezeigt und mittlerweile einen Entwicklungsstand erreicht, der einen Einsatz in kommerziellen Anwendungen ermöglicht. Am Fraunhofer IAF wurde ein Applikationslabor eingerichtet um interessierten Kunden und Endnutzern einen Zugang zu neuartigen QCL-basierten Messverfahren zu ermöglichen. Das Applikationslabor fungiert zugleich als Showroom, in dem mögliche Einsatzbereiche solcher Technologien demonstriert und Auftragsmessungen durchgeführt werden können.

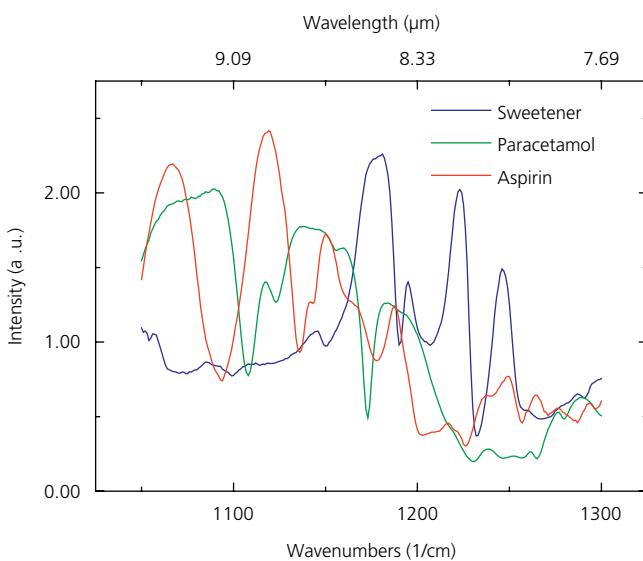
1 ms

*Time required to record
a complete IR spectrum
with a MOEMS-QCL.*

*Benötigte Zeit für die Messung
eines vollständigen Infrarot-
spektrums mittels MOEMS-QCL.*

Der mittlere Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums (MIR) wird oftmals als »molekularer Fingerabdruckbereich« vieler chemischer Verbindungen bezeichnet, die hier ein substanzspezifisches spektrales Absorptionsverhalten zeigen. Da die Absorptionsmerkmale einen Rückschluss auf Zusammensetzung und Art der molekularen Verbindung zulassen ist das MIR in vielen Anwendungsbereichen ein äußerst interessanter Wellenlängenbereich für spektroskopische Analysen und die Identifikation unbekannter chemischer Verbindungen. Quantenkaskadenlaser (QCL) stellen eine vielseitige Lichtquelle mit hohem Anwendungspotential in neuartigen Spektroskopiesystemen im MIR-Bereich dar, da sie eine breite spektrale Durchstimmbarkeit

über hunderte Wellenzahlen bei hoher spektraler Leistungsdichte ermöglichen. Für viele Anwendungen konnte bereits gezeigt werden, dass die Verwendung QCL-basierter Messsysteme vorteilhaft gegenüber konventionellen Spektroskopiemethoden wie der FTIR-Spektroskopie sein kann, insbesondere wenn eine hohe Messgeschwindigkeit oder hohe spektrale Leistungsdichte notwendig ist. Die technologische Reife QCL-basierter Technologien hat in der Zwischenzeit einen Punkt erreicht, der einen Betrieb in industriellem Umfeld ermöglicht. Die technologische Komplexität und der verbleibende Entwicklungsaufwand erschwert es potenziellen Endanwendern jedoch noch, das finanzielle Risiko gegen den Nutzen abzuwägen. Das Infrarot-Applikationslabor am Fraunhofer IAF



2 Contactless, non-destructive real-time spectroscopy in the long-wave infrared range could help improve process control in many industrial applications. The sample spectra to the left were acquired within less than 50 ms from a distance of 1 m.

Abstandsfähige, zerstörungsfreie Echtzeitspektroskopie im langwelligen Infrarotbereich kann dazu beitragen die Prozesskontrolle in vielen industriellen Anwendungsbereichen zu verbessern. Die Rückstreupektronen (oben) wurden in weniger als 50 ms aus einer Entfernung von 1 m gemessen.

of production processes. Together with our partner Fraunhofer IPMS, we developed a laser source which enables real-time spectroscopy: the MOEMS-QCL, which sweeps the full spectral range of a QCL chip (e.g. 1000 cm^{-1} – 1350 cm^{-1}) within 1 ms. Measuring either diffusely backscattered light or transmitted light with an infrared detector enables the

contactless, non-destructive acquisition of up to 1000 spectra per second. This system is therefore capable of performing online process control for a wide range of applications.

Imaging Backscattering Spectroscopy

QCL-based hyperspectral imaging technology is able to acquire chemically selective images of surfaces and detect various substance residues or contaminations. Based on QCLs tunable in the wavelength range of 7.5 to 10 μm that illuminate the surface to be analyzed, Fraunhofer IAF has developed two hyperspectral imaging sensors for standoff detection: One for long-distance measurements to be capable of detecting surface contaminations from distances of up to 20 m, and the other for large-area illumination at closer distances in the range of a few meters.

Spectroscopy of Liquids

Due to the high MIR absorption coefficient of many liquids and water in particular, MIR spectroscopy of free-flowing solutions remains an ambitious task. In the application laboratory, we provide a QCL-based spectroscopy setup that enables the continuous measurement of liquid films. For water, an optical path length of up to 100 μm can be achieved. Such measurements are performed in transmission geometry, where the detector is located behind the sample film and the portion of light absorbed by the medium serves as a measurement signal.

The application laboratory for IR laser spectroscopy opens the door to new application fields for customers and partners: In the manufacturing industry as well as in other economic sectors, our laser technology can help to accelerate production processes, reduce rejection rates, and save costs.

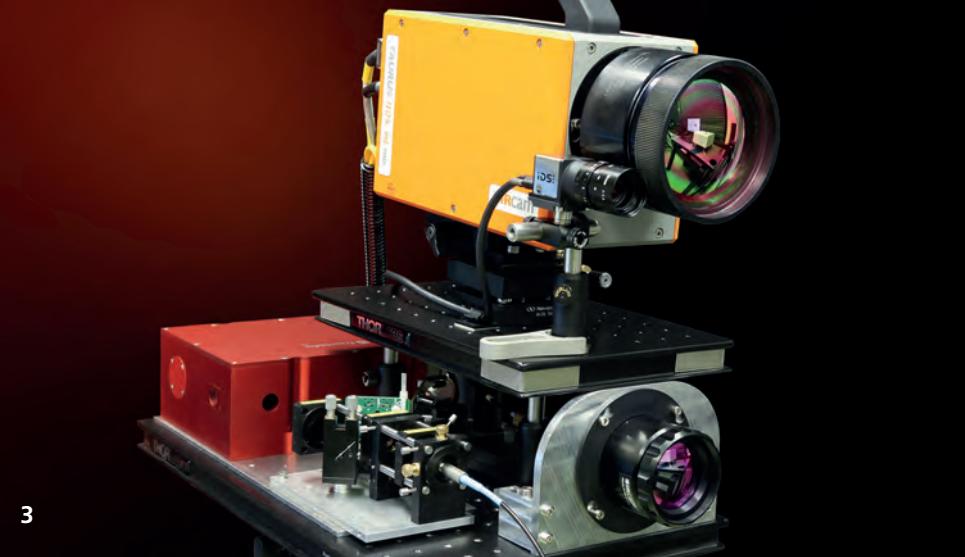
The infrared application laboratory aims to bridge this gap by enabling potential end users to access QCL-based spectroscopy technologies. This is achieved by a showroom, where state-of-the-art spectroscopy devices developed at Fraunhofer IAF are demonstrated and operated. Moreover, preliminary measurements at our facilities are used to support our industry partners to evaluate how QCL-powered technologies meet their specific needs.

20

m

Detection range of the hyperspectral imaging standoff system.
Detektionsreichweite des Hyperspektralbildsystems.

3 Chemically selective images can be acquired using a QCL-based hyperspectral imaging sensor developed at Fraunhofer IAF. The sensor generates images based on 300 adjacent spectral bands in the MIR range of 1000 – 1300 cm⁻¹ using a dual-core QCL module.
Chemisch selektive Bilder mit bis zu 300 Kanälen im MIR-Bereich von 1000 – 1300 cm⁻¹ und hoher örtlicher Auflösung können mit dem Hyperspektralbildsensor generiert werden.



wurde mit dem Ziel eingerichtet, diese Hürde zu senken, indem QCL-basierte Spektroskopietechniken potenziellen Anwendern zugänglich gemacht werden. Dies wird einerseits durch die Einrichtung eines Show-Rooms erreicht, in dem neuartige Spektroskopiesysteme betrieben und demonstriert werden. Darüber hinaus können Messungen in Auftrag gegeben werden, die potenzielle Kunden dabei unterstützen, die Effektivität der Technologien für ihren Anwendungsfall zu evaluieren. Dazu stehen drei QCL-basierte Spektroskopiesysteme zur Verfügung.

Echtzeitspektroskopie

Insbesondere in den Bereichen Pharma- und Lebensmittelproduktion stellen sowohl Gesetzgeber als auch Konsumenten immer höhere Anforderungen an die Qualitätssicherung industrieller Produktionsprozesse, die eine kontinuierliche Überwachung der Inhaltsstoffe erfordert. Zusammen mit dem Fraunhofer IPMS wurde mit dem MOEMS-QCL eine Lichtquelle entwickelt, die Rückstreu- und Transmissionsspektroskopie in Echtzeit ermöglicht: Der MOEMS-QCL scannt den vollständigen Emissionsbereich eines QCL Chips (z. B. 1000 cm⁻¹ – 1350 cm⁻¹) in ca. 1 ms und ermöglicht somit die Akquisition von 1000 Spektren pro Sekunde. Die Messmethode ist zugleich zerstörungsfrei und erfordert im Allgemeinen keine gesonderte Aufbereitung womit sie sich für die Online-Prozesskontrolle in vielen Anwendungsbereichen eignet.

Bildgebende Rückstreupektristik

Die QCL-basierte Hyperspektralbildtechnik ermöglicht es, chemisch selektive Bilder von Oberflächen zu generieren, um Materialrückstände oder Verunreinigungen zu detektieren. Am Fraunhofer IAF wurden zwei Hyperspektralbildsensoren entwickelt, die QCLs im Wellenlängenbereich zwischen 7,5 µm und 10 µm betreiben und jeweils für große Entfernung bis 20 m oder für den Laborbetrieb bei Entfernung bis ca. 5 m optimiert sind.

Flüssigkeitsspektroskopie

Aufgrund des hohen MIR-Absorptionskoeffizienten vieler Flüssigkeiten wie insbesondere Wasser stellt die MIR-Spektroskopie fließfähiger wässriger Lösungen bis heute ein ambitioniertes Ziel dar. Im Applikationslabor bieten wir ein QCL-basiertes Spektrometer, das eine kontinuierliche Messung von Flüssigkeitsfilmen ermöglicht und Messungen mit optischen Weglängen von 100 µm in wässrigen Lösungen erlaubt. Diese werden in einer Transmissionsgeometrie durchgeführt, bei der der Detektor hinter der zu analysierenden Probe positioniert ist und der Anteil des absorbierten Lichts als Messgröße dient. Das Infrarotlaser-Applikationslabor eröffnet unseren Kunden und Partnern neue Anwendungsfelder in der Produktionstechnologie und anderen Wirtschaftszweigen. Unsere Laser können dazu beitragen, Prozesse zu beschleunigen, Ausschussraten zu reduzieren und Kosteneffizienz zu steigern.



1

CVD Reactors for Diamond Growth

Volker Cimalla – volker.cimalla@iaf.fraunhofer.de

Every year, nearly 5000 million carats (1000 tons) of synthetic diamond are produced for industrial use. While most of these diamonds are used in machine and cutting tools, an increasing proportion are also being made into gemstones. Novel applications, however, require a more precise control of basic material parameters, including their spatial distribution. Fraunhofer IAF has developed a flexible reactor family that can be tailored to meet the new challenges of growing high-quality synthetic diamond.

1 Gemstone made from a diamond crystal grown at Fraunhofer IAF.

Brilliant, geschliffen aus einem am Fraunhofer IAF hergestellten Kristall.

Diamond is known as a material with superlative physical qualities. It is the hardest known material, and is highly resistant to scratching and abrasion. Diamond is also chemically inert and resistant to extremely corrosive, radioactive and high temperature environments. As a result, most industrial applications of synthetic diamond have long made use of its hardness, as this property makes diamond the ideal material for machine and cutting tools.

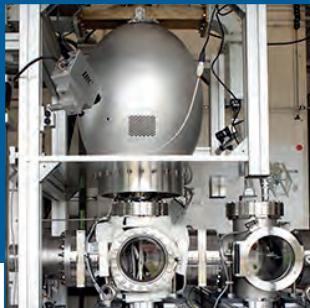
Novel Applications

Additional outstanding properties widen the range of applications. In contrast to most electrical insulators, pure diamond has a high thermal conductivity of 2000 W/m.K, which is the highest of any known solid. It is an attractive option for heat sinks in high-power lasers and transistors, as it can prolong the lifetime of these devices. The wide transmission range

for electromagnetic radiation makes diamond superior to any other existing window material, enabling it to be used in output windows of high-power CO₂ lasers, for example. Finally, synthetic diamond can be doped with impurities like boron and phosphorus, giving it p-type or n-type semiconducting properties. Its large electronic bandgap of 5.45 eV allows diamond to withstand high electric fields and, combined with a high carrier mobility of 4500 cm²/(V·s), this makes it favorable for high-power high-frequency electronics.

Synthetic diamond

The diamond industry can be divided into two main fields: (i) gem-grade diamonds and (ii) industrial-grade diamonds. Both markets have created a high demand for rough stones, which can be satisfied by synthetic diamonds. About 90 % of the diamond material used in cutting tools is of synthetic origin. Synthetic



- Synthetic diamond
- Plasma-assisted chemical vapor deposition
- Homo- and heteroepitaxy
- Ellipsoid plasma reactor
- Doping control

CVD-Reaktoren für das Wachstum von Diamant

Jährlich werden ca. 5000 Millionen Karat (1000 Tonnen) synthetische Diamanten für industrielle Anwendungen produziert. Die meisten Diamanten sind für Bearbeitungs- und Schneidwerkzeuge bestimmt; ein zunehmender Anteil wird auch zu Brillanten verarbeitet. Die neuen Anwendungen erfordern eine präzisere Kontrolle der grundlegenden Materialparameter, einschließlich ihrer räumlichen Verteilung. Das Fraunhofer IAF entwickelte eine Reaktorfamilie, die für die neuen Herausforderungen beim Wachstum von hochwertigen synthetischen Diamanten spezifisch angepasst werden kann.

600

Reactors are designed to grow up to 600 diamond stones simultaneously.

Die Reaktoren sind zum gleichzeitigen Wachstum von 600 Diamanten vorgesehen.

Diamant ist ein Material mit hervorragenden physikalischen Eigenschaften. Es ist der härteste bekannte Werkstoff und sehr kratz- und abriebfest. Darüber hinaus ist Diamant auch chemisch inert und resistent gegen extrem korrosive, radioaktive Umgebungen sowie stabil bei hohen Temperaturen. Deshalb sind die meisten industriellen Anwendungen von synthetischem Diamant seit langem mit seiner Härte verbunden, denn diese Eigenschaft macht Diamant zum idealen Werkstoff für Bearbeitungs- und Schneidwerkzeuge.

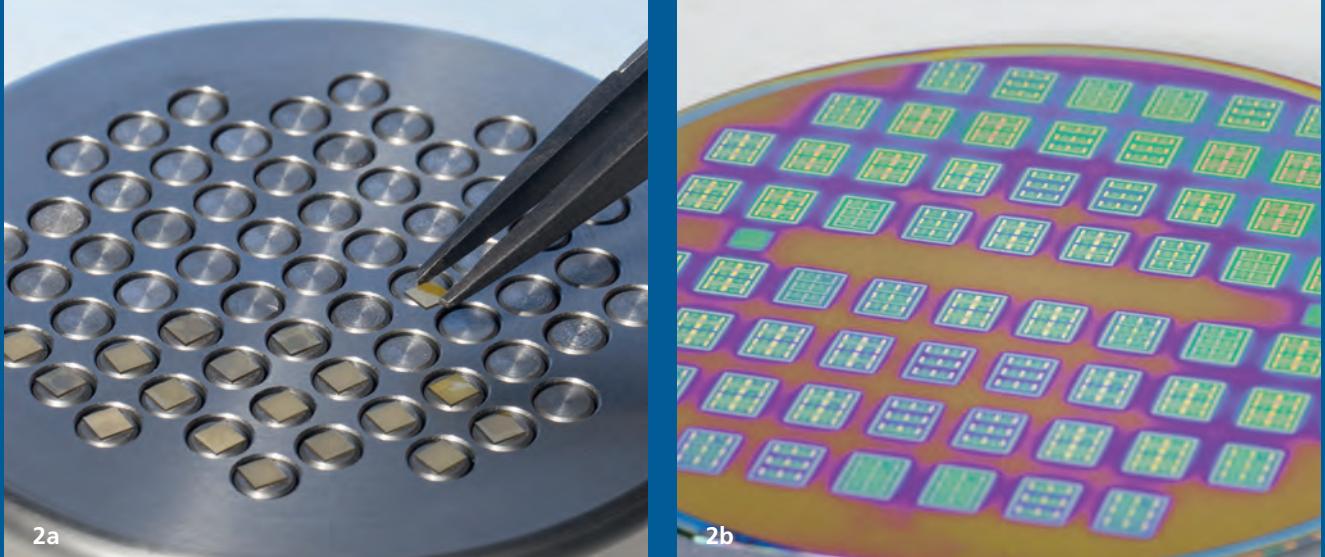
Neue Anwendungen

Seine zusätzlichen herausragende Eigenschaften erweitern das Anwendungsspektrum. Im Gegensatz zu den meisten elektrischen Isolatoren hat reiner Diamant eine hohe Wärmeleitfähigkeit von 2000 W/m.K, welche die höchste aller bekannten Feststoffe ist. Folglich ist der Einsatz in Kühlkörpern für Hochleis-

tungslaser und Transistoren eine attraktive Option, um die Lebensdauer dieser Bauelemente zu verlängern. Der breite Transmissionsbereich für elektromagnetische Strahlung macht Diamant jedem anderen bestehenden Fenstermaterial überlegen, wodurch z. B. die Verwendung in Ausgangsfenstern von Hochleistungs-CO₂-Lasern möglich wird. Zudem kann synthetischer Diamant auch mit Fremdstoffen wie Bor und Phosphor dotiert werden, was zu p-leitenden oder n-leitenden halbleitenden Eigenschaften führt. Sein großer elektronischer Bandabstand von 5,45 eV gewährleistet, dass Diamant hohen elektrischen Feldern standhält. Die Kombination mit einer hohen Ladungsträgermobilität von 4500 cm²/(V·s) ist besonders für die Hochleistungs-Hochfrequenz-Elektronik vorteilhaft.

Synthetischer Diamant

Die Diamant-Industrie kann in zwei Haupt-



- 2** *a) Single crystalline diamond seeds on a multiple mount.
b) Nanocrystalline diamond for MEMS on a 4" wafer.*
*a) Einkristalline Diamanten auf einem Mehrfachhalter.
b) Nanokristalliner Diamant für MEMS auf einem 4"-Wafer.*

diamond, however, can also be cut into gems and various colors can be produced. Such diamonds represent about 2 % of the gem-quality diamond market, but this is set to increase. Novel applications in electronics, photonics, and quantum technologies, however, require the diamond material to have tailored properties, such as controlled doping with impurities in order to define specific conductivity. Moreover, these properties have to be realized in well-defined spatial profiles. Such structures can only be created using a layer deposition technique such as plasma-assisted chemical vapor deposition.

Chemical Vapor Deposition

Chemical vapor deposition (CVD) is a common method for growing synthetic diamond from a hydrogen-hydrocarbon gas mixture. Typically, methane is used as a carbon source, while hydrogen in a ratio of about 100:1 is essential to selectively etch off non-diamond carbon. In contrast to the second major technique, high pressure and high temperature (HPHT), CVD is flexible enough to grow customized synthetic diamond for different applications. Important parameters are high purity, process stability, and repeatability for small single crystalline diamond seeds as well as for large-area

wafer-scale deposition. Moreover, precise doping control with boron or phosphorus, which is a prerequisite for forthcoming applications in electronics, can be realized without contamination by further impurities.

Fraunhofer IAF has a long-standing experience in growing diamond using ellipsoid plasma reactors invented and built in-house. Initially designed to grow polycrystalline diamond, the reactor was further developed to grow diamond material covering a wide range of specifications. Recent activities concentrate on growing single crystalline diamond. Examples are intentionally doped diamond for electronic devices, ultra-pure diamond with localized defects for use in quantum technology experiments and devices, as well as pure diamonds to be used as gemstones. In all cases, the CVD reactors were adapted to the specific requirements for the diamond. Most recently, a new reactor was built and transferred to an industrial partner, which is able to grow a large number of diamonds simultaneously to be used as gemstones. The technology is also being developed to enable the scaling of heteroepitaxial growth of single crystalline diamond to wafer level for use as heat spreaders and in electronics.



3 Growth reactor that can be loaded with up to 600 diamond seeds or a single 6" wafer.

CVD-Reaktor, der mit bis zu 600 Diamanten oder einem 6"-Wafer beladen werden kann.

6"

Maximum wafer size for growing diamond.
Maximale Wafergröße, auf der Diamant gewachsen werden kann.

bereiche unterteilt werden: (i) Diamanten für Schmuck und (ii) Diamanten industrieller Qualität. Beide Märkte haben hohen Bedarf an Rohsteinen, der durch synthetische Diamanten befriedigt werden kann. Etwa 90 % des Diamantmaterials für Schneidwerkzeuge ist synthetischer Herkunft. Synthetischer Diamant kann jedoch auch zu Edelsteinen geschliffen werden; zudem sind verschiedene Farben herstellbar. Solche Diamanten repräsentieren etwa 2 % des Diamantmarkts für Edelsteinqualität, mit einer Tendenz zur weiteren Zunahme. Neuartige Anwendungen in der Elektronik, Photonik und Quantentechnologie erfordern jedoch maßgeschneiderte Eigenschaften des Diamantmaterials, wie eine kontrollierte Dotierung mit Fremdatomen, um eine spezifische Leitfähigkeit zu definieren. Zudem müssen diese Eigenschaften in gut definierten räumlichen Profilen eingestellt werden. Solche Strukturen können nur durch eine Schichtabscheidungstechnik, wie die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung, realisiert werden.

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

CVD ist eine gängige Methode, bei der synthetische Diamanten in einem Wasserstoff-Kohlenwasserstoff-Gasgemisch gewachsen werden. Typischerweise wird Methan als Kohlenstoffquelle verwendet, während Wasserstoff in einem Verhältnis von etwa 100:1 den gleichzeitig entstehenden, nicht diamantartigen Kohlenstoff wegätzt. Im Gegensatz zu der zweiten etablierten Methode, der Synthese bei hohen Drücken und Temperaturen (HPHT), zeichnet sich CVD durch eine hohe

Flexibilität aus, um synthetische Diamanten anwendungsspezifisch zu wachsen. Wichtige Parameter sind hohe Reinheit, Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit. Außerdem kann eine präzise Dotierungskontrolle mit Bor oder Phosphor, die eine Voraussetzung für zukünftige Anwendungen in der Elektronik ist, ohne Verunreinigung durch weitere Fremdstoffe realisiert werden.

Das Fraunhofer IAF verfügt über langjährige Erfahrung im Diamantwachstum mit Plasmareaktoren, die am IAF entwickelt und gebaut wurden. Sie wurden zunächst für das Wachstum polykristalliner Diamanten entwickelt, mittlerweile wird damit aber Diamant für eine breite Palette von Spezifikationen hergestellt. Die jüngsten Aktivitäten konzentrieren sich auf das Wachstum einkristalliner Diamanten. Beispiele sind dotierte Diamanten für elektronische Bauelemente, ultrareine Diamanten mit lokalisierten Defekten zur Verwendung in quantentechnischen Experimenten und Bauelementen sowie reine Diamanten, die zu Brillanten verarbeitet werden können. 2016 wurde ein neuer Reaktor gebaut und an einen industriellen Partner übertragen, der in der Lage ist, gleichzeitig eine große Anzahl von Diamanten zu wachsen, die für die Verarbeitung zu Edelsteinen geeignet sind. Gegenwärtig zielt die Weiterentwicklung der Reaktoren am Fraunhofer IAF auf eine Skalierung des heteroepitaktischen Wachstums von einkristallinem Diamant auf größere Flächen (Wafern) für Anwendungen als Wärmespreizer und in der Elektronik.



Already today we also work in projects paving the way, for example, towards the future use of quantum technologies in real-world applications. These projects include research on the physics and technology behind defect centers in diamond, which are essential for creating solid-state quantum technology devices, as well as the development of leading-edge detectors, lasers, and ultra-low-noise amplifiers needed for implementing optics-based quantum technologies. Further examples are hardware and software development for real-time millimeter-wave cameras and research into the production of efficient 100 – 300 GHz power amplifiers.

Bereits heute arbeiten wir an Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit längerfristigem Anwendungspotenzial. Darin geht es beispielsweise um die gezielte Erzeugung von Defektzentren in synthetischem Diamant als Basis für praktische Festkörper-basierte Quanten-Magnetometrie oder die Entwicklung von Photodetektoren, Lasern und extrem rauscharmen Verstärkern als Schlüsselkomponenten für die praktische Nutzung photonischer Quantentechnologien. Zudem arbeiten wir an der Realisierung von Hard- und Software für eine echtzeitfähige Millimeterwellen-Kamera, sowie an effizienten Verstärkern für 100 – 300 GHz.



- 42 CRYOGENIC LNAs FOR MICRO- AND MILLIMETER-WAVE RECEIVERS**
Kryogene LNAs für Mikrowellen- und Millimeterwellenwellenempfänger
- 46 MILLIMETER-WAVE RADAR CAMERA**
Millimeterwellen-Radar-Kamera
- 50 RF POWER GENERATION BETWEEN 94 AND 300 GHz**
Hochfrequenz-Leistungserzeugung von 94 GHz bis 300 GHz
- 54 CHARGE CONTROL OF SINGLE NV CENTERS IN DIAMOND**
NV-Zentren in Diamant: Kontrolle des Ladungszustands
- 58 IR-LASER FOR HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY AND METROLOGY**
Infrarotlaser für hochauflösende Spektroskopie und Metrologie
- 62 INFRARED DETECTORS FOR SINGLE PHOTONS**
Infrarot-Detektoren für einzelne Photonen



Research for Tomorrow

Schon heute Anforderungen von Morgen erkennen



Cryogenic LNAs for Micro- and Millimeter-wave Receivers

Fabian Thome – fabian.thome@iaf.fraunhofer.de

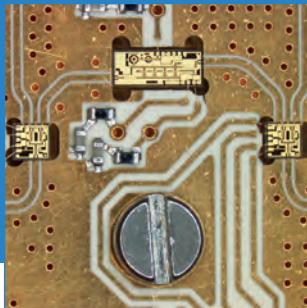
Cryogenically cooled low-noise amplifiers are becoming increasingly important, as they are essential building blocks for micro- and millimeter-wave receivers with ultimate sensitivity. Since the noise figure of amplifiers decreases the lower the ambient temperature, systems are cooled to an operating temperature of a few kelvin if ultra-low noise figures are required. High-electron-mobility transistor technologies are beneficial for the creation of highly sensitive receiver systems in, for instance, radio astronomy, quantum computing, or cooled receivers in base stations for mobile communications.

- 1 *mHEMT-based cryogenic low-noise amplifiers can be used in radio telescopes.*
mHEMT-basierte kryogene rauscharme Verstärker können in Radioteleskopen eingesetzt werden.

What are the limits of Einstein's general theory of relativity and how do galaxies form? Radio telescopes are decisive instruments for answering these fundamental physical questions. Modern radio telescopes enable signals to be received from galaxies at the edge of the observable universe. Highly sensitive receiver systems are required to receive these very weak cosmic signals. This requires the receiver front-end, especially the first low-noise amplifier (LNA), to be cooled to a few kelvin to minimize the inherent noise of the amplifiers. The metamorphic high-electron-mobility transistor (mHEMT) technology developed at Fraunhofer IAF performs excellently, since the mHEMT technology provides a very low noise figure that is mainly determined by thermal or Johnson noise. This means that the remaining noise of the mHEMTs can be drastically reduced by cryogenic cooling.

The Square Kilometer Array

In cooperation with the Max Planck Institute for Radio Astronomy in Bonn, Germany, Fraunhofer IAF is developing cryogenically cooled low-noise amplifiers for radio astronomical applications, such as the Square Kilometre Array (SKA). The collecting area is a vital parameter for the sensitivity of radio telescopes. The larger the collecting area, the weaker a detectable signal can be and, therefore, the larger the observation distance. However, for mechanical reasons, the diameter of a single dish (parabolic antenna) is limited. In order to overcome this limitation, large modern radio telescopes consist of arrays of correlated dishes, where each dish operates as a small single telescope. The SKA will become the world's largest radio telescope and will far exceed the limits of current observatories. During the first stage (SKA1), 200 dishes will be implemented in South



- Radio astronomy
- Quantum electronics
- Cryogenic base station front end
- Very high sensitivity
- Ultra-low-noise amplifier

Kryogene LNAs für Mikrowellen- und Millimeterwellenempfänger

Kryogene rauscharme Verstärker sind die entscheidenden Komponenten für Mikrowellen- und Millimeterwellenempfänger mit sehr hoher Sensitivität. Wenn eine extrem niedrige Rauschzahl benötigt wird, werden die Empfänger auf eine Betriebstemperatur von wenigen Kelvin gekühlt, da die Rauschzahl von Verstärkern mit sinkender Umgebungstemperatur abnimmt. Transistor-technologien mit hoher Elektronenbeweglichkeit bieten signifikante Vorteile für Empfangssysteme mit hoher Sensitivität, zum Beispiel für Anwendungen in der Radioastronomie, der Quantenelektronik oder für gekühlte Empfänger in Basisstationen im Mobilfunk.

4.2 K

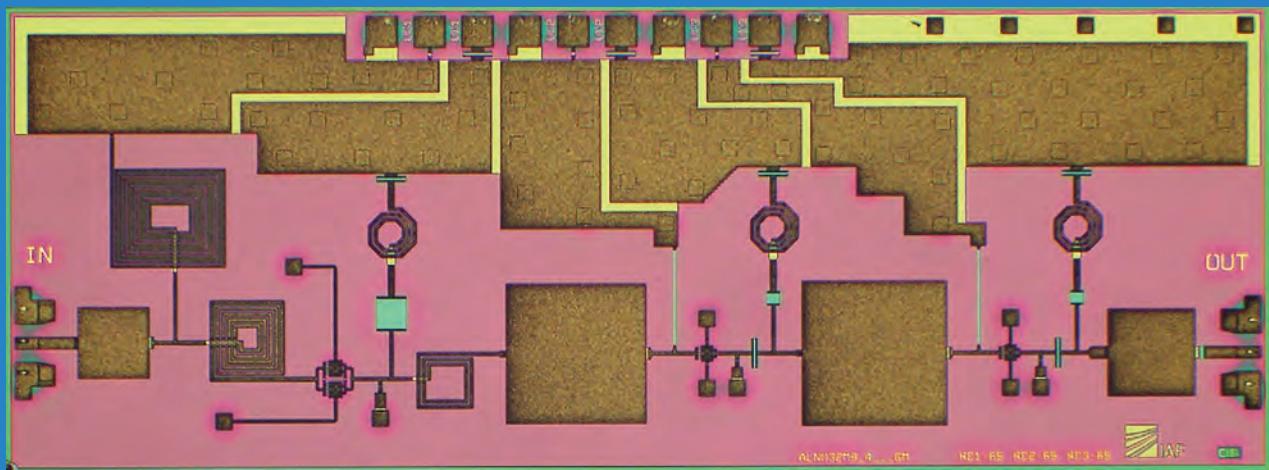
The temperature of liquid helium during the operation of cryogenic amplifiers.

Die Temperatur von flüssigem Helium, bei der kryogene Verstärker betrieben werden. Wie entstehen Galaxien? Wo sind die Grenzen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie? Bei der Beantwortung dieser grundlegenden physikalischen Fragen sind Radioteleskope entscheidende Instrumente. Moderne Radioteleskope ermöglichen die Detektion von Signalen von Galaxien am Rande des beobachtbaren Universums. Um diese schwachen kosmischen Signale empfangen zu können, sind hochsensitive Empfangssysteme notwendig. Daher werden Empfänger, vor allem der erste rauscharme Verstärker (low noise amplifier, LNA), auf wenige Kelvin gekühlt, um ihr Eigenrauschen zu reduzieren. Die mHEMT-Technologie (metamorphic high electron mobility transistor) des Fraunhofer IAF weist hervorragende Eigenschaften auf, da das geringe Rauschen der mHEMT-Technologien vor allem durch thermisches Rauschen bestimmt ist. Daher

kann das Rauschen der Transistoren durch kryogenes Kühlen stark reduziert werden.

Das Square Kilometer Array

Ein entscheidender Parameter für die Sensitivität von Radioteleskopen ist deren Sammelfläche. Je größer die Sammelfläche ist, desto schwächer kann ein detektierbares Signal sein und desto größer ist die Beobachtungsdistanz. Jedoch ist der Durchmesser eines Parabolspiegels aus mechanischen Gründen begrenzt. Deswegen bestehen große moderne Teleskope aus einem Array von korrelierten Antennen. Dabei wird jeder Spiegel als kleines Teleskop betrieben. Das Fraunhofer IAF entwickelt in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn kryogene rauscharme Verstärker für das Square Kilometre Array (SKA). Das SKA wird die Grenzen von heutigen



2

2 Chip photograph of a fully integrated cryogenic LNA MMIC (1.5 – 6 GHz) for e. g. radio astronomical applications.

Foto eines integrierten kryogenen LNA-MMICs (1,5 – 6 GHz) für z. B. radioastronomische Anwendungen.

Africa and Australia. This will improve the sensitivity by a factor of five compared with today's radio telescopes. During the second stage (SKA2), the number of dishes, and thus the sensitivity of the SKA, will increase by an order of magnitude. Since each dish and each receiver frequency band requires at least one low-noise amplifier, a technology with the ability to provide several thousand high-performing amplifiers is needed. This is why Fraunhofer IAF is focusing on developing monolithic microwave integrated circuit (MMIC) LNAs, with each wafer run capable of producing several hundred MMICs.

Challenges in Cryogenic Amplifier Design

Soon after HEMT devices appeared in around 1980, their potential for ultra-low-noise amplifiers was realized and shortly afterwards their superior cryogenic performance was also investigated. However, several scientific groups detected that the DC and RF characteristics of single transistors and entire amplifiers exhibited anomalous behavior at cryogenic temperatures, which degraded the noise performance. Transistors with more than two transistor fingers seemed to be more affected by this behavior, drawing attention to their instability. Researchers at Fraunhofer IAF demonstrated that the anomalous behavior of cryogenically cooled multi-finger HEMTs is due to an internal oscillation of the transistors. Very often the oscil-

lation appears at much higher frequencies than the operating frequency, in the range of a few hundred gigahertz, where mHEMTs still have considerable gain. The researchers at Fraunhofer IAF revealed that a novel transistor layout prevents this internal oscillation, enabling the design of new high-performance ultra-low-noise amplifiers for a multitude of applications. Based on these achievements, the dishes for the first implementation step of band 3 (1.65 – 3.05 GHz) in SKA1 (MeerKAT) will be equipped with LNA MMICs designed and produced at Fraunhofer IAF.

Beyond Radio Astronomy

The achievements and the experience gained during the design and production of cryogenic LNA MMICs pave the way for novel applications, such as quantum computing and cooled LNAs for base stations in mobile communications. In quantum computing, cryogenic LNAs are required for the RF read-out electronics of spin qubits, the quantum analog of the classical bit. In mobile communications, cooled LNAs improve the sensitivity of the receiver part and can help to reduce the power consumption of future base stations. In summary, it can be stated that Fraunhofer IAF's mHEMT technology performs exceedingly well in cryogenic applications, such as radio astronomy, quantum computing, and cooled LNAs for base stations in mobile communications.

3.2 K

*Average noise temperature
of a fully integrated
cryogenic LNA MMIC.
Durchschnittliche Rausch-
temperatur eines integrierten
kryogenen LNA-MMICs.*

Teleskopen weit übertreffen. In einem ersten Schritt werden in Südafrika und Australien 200 Empfangsspiegel errichtet, was die Sensitivität heutiger Radioteleskope um den Faktor fünf verbessert. In einem zweiten Schritt werden dann die Anzahl der Antennen und somit auch die Sensitivität um eine Größenordnung vergrößert. Da jeder Spiegel und jedes Empfangsband mindestens einen LNA benötigt, ist eine Technologie erforderlich, die in der Lage ist, mehrere tausend Verstärker bereitzustellen. Daher legt das Fraunhofer IAF den Schwerpunkt auf die Entwicklung von monolithisch integrierten LNAs. Dabei können in jedem Fertigungsdurchlauf mehrere Hundert Chips hergestellt werden.

Herausforderungen beim Entwurf kryogener Verstärker

Bereits früh nach dem Aufkommen von HEMT-Bauteilen um 1980 wurde deren Potential für ultra-rauscharme Verstärker deutlich. Jedoch beobachteten mehrere wissenschaftliche Gruppen ein ungewöhnliches DC- und HF-Verhalten von Einzeltransistoren und kompletten Verstärkern bei kryogenen Temperaturen, welches das Rauschen verschlechtert. Transistoren mit mehr als zwei Transistorfingern scheinen von diesem Verhalten stärker betroffen zu sein, weshalb Instabilitäten in den Vordergrund rücken. Wissenschaftler des Fraunhofer IAF zeigten auf, dass das ungewöhnliche Verhalten von gekühlten HEMTs mit mehreren Fingern durch eine interne Oszillation des Transistors bedingt ist. Häufig tritt die Oszillation

bei deutlich höheren Frequenzen als der Betriebsfrequenz auf, im Bereich von mehreren hundert Gigahertz, wo mHEMTs noch ausreichend Verstärkung aufweisen. Die Wissenschaftler des Fraunhofer IAF entwickelten ein neues Transistorlayout, was die internen Oszillationen unterbindet und den Entwurf neuer hochleistungsfähiger LNAs für eine Vielzahl von Anwendungen ermöglicht. Basierend auf diesen Errungenschaften werden die Teleskope in einer ersten Umsetzung für Band 3 (1,65 – 3,05 GHz) mit LNA-MMICs ausgestattet, die am Fraunhofer IAF entworfen und gefertigt wurden.

Über die Radioastronomie hinaus

Die Erfahrungen und Errungenschaften, die im Entwurf und der Fertigung von kryogenen LNA-MMICs gewonnen wurden, bereiten den Weg für neue Anwendungen, wie zum Beispiel Quantencomputer und gekühlte LNAs für Basisstationen im Mobilfunk. Bei Quantencomputern werden kryogene LNAs als HF-Ausleseelektronik für Spin Qubits benötigt, einem Quantengegenstück des klassischen Bits. Beim Mobilfunk verbessern gekühlte LNAs die Sensitivität des Empfängers und können helfen, die Leistungsaufnahme von zukünftigen Basisstationen zu senken.

Die mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF bietet also hervorragende Eigenschaften für unterschiedliche kryogene Anwendungen, wie die Radioastronomie, Quantencomputer oder für Basisstationen im Mobilfunk.



1

Millimeter-wave Radar Camera

Markus Rösch – markus.roesch@iaf.fraunhofer.de

Millimeter-wave 3D imaging can be used to provide good visibility in scenarios where optical and infrared cameras struggle. The ability to penetrate dust, fog, and smoke at these wavelengths with little opacity can improve the vision of rescue units in the event of fires in tunnels or forests. Today's high-frequency packaging technologies are improving in terms of compactness and back-end electronics enable parallel data processing of numerous channels. Both these advances are important steps towards developing a more cost-efficient real-time millimeter-wave 3D MIMO imaging system.

- 1 *Increased smoke levels restrict the visibility of rescue workers.*

Starke Rauchbildung in einem Tunnel schränkt die Sicht der Rettungskräfte ein.

Visibility in dust, fog, or smoke is essential to both civilian and military rescue forces. If a fire starts in a tunnel after an accident, vision soon becomes obscured by smoke. Due to heat, it is perilous for fire-fighters to approach the source of the fire. If there is evidence that injured people remain in the danger zone, it would be of vital importance to gain information about the scene, including the number and location of potential victims.

Fraunhofer IAF is currently developing a millimeter-wave radar imaging system based on the MIMO principle (multiple input multiple output) that will be able to operate under such conditions. The system uses frequency-modulated continuous-wave radar (FMCW) in order to produce images in both 2D and 3D. This enables additional

information about the distance of an object hidden by dust or smoke to be provided in scenarios such as those described above. By using the advantages of a sparse array as opposed to a focal-plane array, MIMO tremendously reduces the required amount of high-frequency hardware. The frequency of the system is in the W-band, which is close to 100 GHz, and has a wavelength of 3 mm. This guarantees low atmospheric attenuation and a compact system assembly. The short wavelength in combination with a high frequency bandwidth enables imaging with sufficient resolution for the aforementioned scenarios.



- **MIMO imaging system**
- **FMCW for 3D imaging**
- **Real-time capability**
- **22 receivers and 22 transmitters**
- **Compact packaging of RF modules**

Millimeterwellen-Radar-Kamera

3D-Bildgebung mittels Millimeterwellen ermöglicht es, den Durchblick zu behalten, wenn optische und Infrarot-Kameras an ihre Grenzen stoßen. Die Fähigkeit, bei diesen Wellenlängen Staub, Nebel und Rauch mit geringer Dämpfung zu durchdringen, kann die Sicht von Rettungskräften im Fall von Wald- und Tunnelbränden erheblich verbessern. Heutige Hochfrequenz-Aufbautechniken werden immer kompakter und moderne Elektronik erlaubt parallele Datenverarbeitung von zahlreichen Kanälen. Beides sind wichtige Schritte hin zur Entwicklung eines kosteneffizienteren echtzeitfähigen MIMO-Systems im Millimeterwellenbereich zur 3D-Bildgebung.

100 GHz

Transmit and receive frequency; electromagnetic radiation at this frequency is able to penetrate dust, fog and smoke.

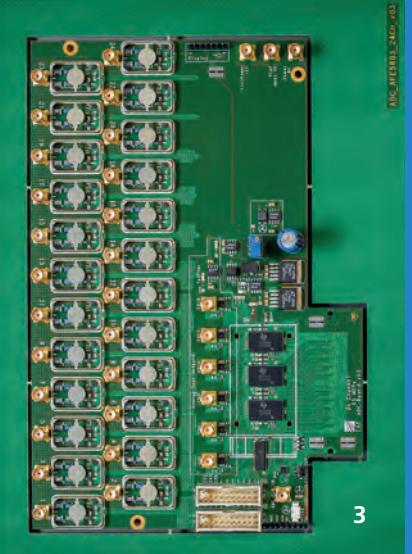
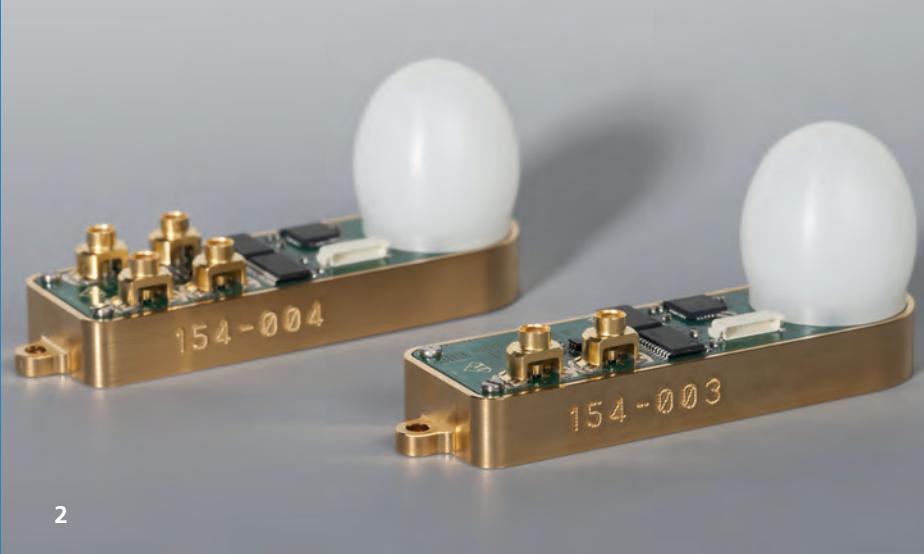
Send- und Empfangsfrequenz; elektro-magnetische Strahlung bei dieser Frequenz kann Staub, Nebel und Rauch durchdringen.

Sowohl für zivile als auch für militärische Anwendungen kann es essenziell sein, durch Staub, Nebel oder Rauch zu blicken. Bei einem Feuer in einem Tunnel kann die Sicht durch Rauchbildung stark eingeschränkt sein. Aufgrund starker Rauch- und Hitzeentwicklung ist es für Feuerwehrkräfte lebensgefährlich sich dem Brandherd zu nähern. Besteht der Verdacht auf verletzte Personen in der Gefahrenzone, sind Informationen über das Szenario, Ort und Anzahl möglicher Opfer von großer Wichtigkeit.

Das Fraunhofer IAF entwickelt derzeit eine Millimeterwellen-Kamera, die auf dem Prinzip von MIMO (multiple input multiple output) basiert und unter genannten Bedingungen eingesetzt werden könnte. Das System nutzt frequenzmoduliertes Dauerstrichradar

(FMCW), um Bildgebung nicht nur in 2D sondern auch in 3D zu ermöglichen.

Dadurch können zusätzliche Informationen über den Abstand zu einem bestimmten Objekt, das durch Rauch oder Staub verdeckt ist, gewonnen werden. MIMO nutzt den Vorteil eines ausgedünnten Arrays im Vergleich zu Focal-Plane-Arrays, was den Hardware-Aufwand von Hochfrequenzmodulen deutlich reduziert. Die Frequenz liegt hierbei im W-Band, welches im Bereich von 100 GHz liegt, bei einer Wellenlänge von 3 mm. In diesem Bereich ist die atmosphärische Dämpfung sehr gering. Die verhältnismäßig kleine Wellenlänge in Verbindung mit einer hohen Frequenzbandbreite erlaubt eine Bildgebung mit ausreichender Auflösung für die genannten Anwendungen.



- 2 100 GHz receiver and transmitter module.**
100 GHz Empfangs- und Sendemodul.
- 3 24 channel analog-to-digital conversion board.**
24-kanaliges Analog-zu-Digital-Wandlerboard.

High-Frequency Modules and Data Processing

The prototype consists of 22 transmitters and 22 receivers arranged in an aperture. The modules have been produced on hybrid printed circuit boards (PCB) where high-frequency microwave monolithic integrated circuits (MMIC) have been fitted. The MMICs are made using the Fraunhofer IAF 100 nm metamorphic high-electron-mobility transistor (mHEMT) technology and have an operational bandwidth of 30 GHz in the W-band. The multifunctional MMICs contain all high-frequency components, such as frequency multipliers, low-noise amplifiers, and mixers. A medium power amplifier is used in the transmitter to achieve an output power of around 10 mW. The hybrid PCB layer stack is built up of a liquid crystal polymer layer for the RF part and an FR4 layer for the biasing circuit part. To focus the electromagnetic wave, a high-density polyethylene (HDPE) lens with an aperture angle of 12° is used, making the packaging compact and less expensive.

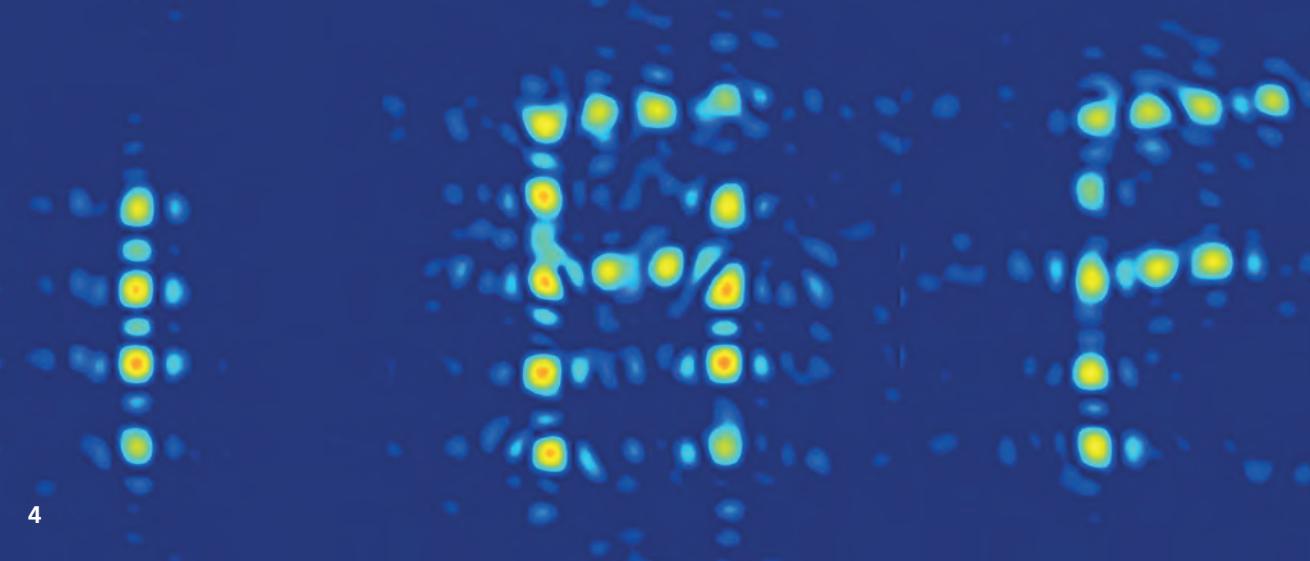
The FMCW frequency ramp is generated in a direct digital synthesizer (DDS) provided by Fraunhofer FHR with an output carrier frequency of around 8 GHz. This local oscillator (LO) signal is then routed to the receivers and transmitters. Since only one transmitter is active at a time, a switching PCB has been developed in order to apply a specific

switching sequence to them. The intermediate frequency (IF) of this prototype is in the order of 1 MHz. The 22 IF channels are then digitized in parallel with an analog-to-digital converter PCB that was also developed at Fraunhofer IAF. It consists of 24 AD converters, each with a sampling rate of 50 MSPS, as well as IF filters and amplifiers for each channel. This board is connected to a commercially available Xilinx FPGA evaluation board, where the data is stored and transferred via Ethernet to a PC for offline image reconstruction.

Towards a Real-time Millimeter-wave 3D Imaging System

Measurements of objects at distances from 5 to 60 m have already been successfully performed. An example of a 2D measurement and image reconstruction can be seen above right. Here, the letters »IAF« have been built out of small corner reflectors located at a distance of 5 m from the imager. Collecting the data for one image takes about 8 ms, which corresponds to a data acquisition rate of 130 Hz.

Fraunhofer IAF is currently working on implementing the image reconstruction algorithms into an FPGA. This will avoid the need for offline data processing and will enable 3D imaging in real time. The image can then be directly visualized on a display via a VGA interface on the FPGA board.



4

4 *Measurement of the letters »IAF« built out of corner reflectors at a distance of 5 m.*
Messung des IAF-Schriftzugs aus Corner-Reflektoren in 5 m Entfernung.

130
Hz

*Data rate for collecting the raw data per image.
Datenrate zur Aufnahme der Rohdaten pro Bild.*

Hochfrequenzmodule und Datenverarbeitung

Der existierende Prototyp besteht aus 22 Sendern und 22 Empfängern, die in einer Apertur angebracht sind. Die Module wurden auf hybriden Leiterplatten realisiert, auf die die MMICs (microwave monolithic integrated circuits) integriert wurden. Die MMICs wurden am Fraunhofer IAF entwickelt und mit der hauseigenen mHEMT-Technologie (metamorphic high-electron mobility transistor) hergestellt. Die MMICs verfügen über eine nutzbare Bandbreite von 30 GHz im W-Band. Die multifunktionellen Chips beinhalten alle Hochfrequenzkomponenten wie Frequenzvervielfacher, rauscharme Verstärker und Mischer. Für den Sender wird ein Leistungsverstärker mit mittlerer Ausgangsleistung von ca. 10 dBm verwendet. Der hybride Lagenaufbau der Leiterplatte besteht aus einer Schicht Flüssigkristall-Polymer für die Hochfrequenzelektronik und einer Schicht FR4 für die Führung der Stromversorgung. Zur Fokussierung der Sende- und Empfangsstrahlung wird eine Polyethylen-Linse mit einem Öffnungswinkel von 12° verwendet, was den Aufbau kompakt und kostengünstig gestaltet.

Das FMCW-Signal wird über einen vom Fraunhofer FHR bereitgestellten DDS (direct digital synthesizer) generiert, der eine Trägerfrequenz von ca. 8 GHz besitzt. Das Signal

wird dann auf alle Sender und Empfänger verteilt. Da immer nur ein Sender gleichzeitig aktiv ist, wurde eine Schaltmatrix realisiert, die es ermöglicht, eine spezielle Schaltsequenz zu implementieren. Die Zwischenfrequenz der Empfängermodule liegt im Bereich von 1 MHz. Die 22 Kanäle werden anschließend mit einem eigens entwickelten Board mit 50 MSPS A/D parallel gewandelt. Dieses Board ist mit einem kommerziellen FPGA-Evaluationsboard verbunden, um Daten zwischenzuspeichern und via Ethernet an einen PC zu übertragen.

In Richtung einer echtzeitfähigen 3D-Millimeterwellen-Kamera
Erste Messungen mit dem entwickelten System wurden bereits zwischen 5 m und 60 m Entfernung zum Objekt durchgeführt. Ein Beispiel einer 2D-Messung ist oben abgebildet. Hierzu wurde der IAF-Schriftzug aus kleinen Corner-Reflektoren nachgebildet und in 5 m Entfernung aufgenommen. Die Aufnahme eines Bildes dauert 8 ms, was einer Datenakquisitionsrate von ca. 130 Hz pro Bild entspricht. Das Fraunhofer IAF arbeitet derzeit an der Implementierung der Algorithmen zur Bildrekonstruktion in einen FPGA. Die Rohdaten können dadurch in Echtzeit ausgewertet und über einen VGA-Anschluss auf einem Monitor angezeigt werden.



1

RF Power Generation between 94 and 300 GHz

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

Efficient power amplifiers operating in the mm-wave regime are key enablers for advanced sensor and communication applications, such as imaging radar and high-speed broadband communication links. The very high bandwidths and spatial resolution achievable at the evolving frequency range between 94 and 300 GHz can only be used for novel high-resolution radars and high-data-rate communication links if compact high-power amplifiers with high single-chip output power are available.

- 1 *UAV mm-wave sensors require high RF power levels to combine high resolution with high range.*

Millimeterwellen-Sensoren für Drohnen benötigen hohe Leistungen, um neben hohen Auflösungen auch hohe Reichweiten zu ermöglichen.

©Bundeswehr / Sebastian Wilke

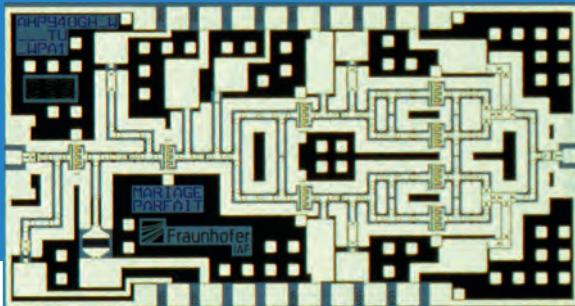
Advanced radar and communication systems in the range of 94 to 300 GHz suffer from a lack of inexpensive, compact solid-state-based power amplifiers. Depending on the semiconductor technology, as frequency increases the effective available RF power decreases inversely proportional to the power of 2 to 4. Fig. 2 provides the state-of-the art power results of integrated circuits vs. frequency achieved at Fraunhofer IAF to cope with the demand for mm-wave power amplifiers. The figure also suggests a lack of power amplifiers beyond 100 GHz. This has prompted intense research activities.

Applications

The availability of high-performance mm-wave power amplifiers will enable new radar systems and advanced sensing with very high resolution, while preserving the compactness of the sensors. Due to the short

wavelength, mm-wave sensors can be made very compact, i.e. modules with a high level of integration will require less than 1 cm³ of volume. Very precise geometrical imaging information from frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radars can be used for safety and security applications, e.g. standoff detection of concealed threats. However, the power levels available in compact SAR (synthetic aperture radar) sensors for unmanned airborne vehicles (UAVs) are currently not sufficient to enable the UAV to have a good observation radar range.

MIMO (multiple input multiple output) systems are very promising for multi-function sensors allowing electronic beam steering. However, these systems urgently require high-efficiency power amplifiers to ensure a sufficiently long UAV operation time.



- RF power generation
- Millimeter-wave
- Radar
- Point-to-point data links
- Power amplifiers

Hochfrequenz-Leistungserzeugung von 94 GHz bis 300 GHz

Effiziente Leistungsverstärker im Millimeterwellenbereich sind Schlüsselkomponenten für anspruchsvolle Sensoren und Kommunikationsanwendungen wie abbildendes Radar und breitbandige Hochgeschwindigkeits-Datenverbindungen. Doch nur bei Verfügbarkeit von Einchip-Leistungsverstärkern mit hoher Ausgangsleistung im Frequenzbereich 94 GHz bis 300 GHz können die hohen Datenraten (Gbit/s) breitbandiger Links und die hohe räumliche Auflösung von innovativen Radaren genutzt werden.

1 W

Die Entwicklung von kostengünstigen kompakten Festkörperverstärkern auf Halbleiterbasis ist notwendig, um fortschrittliche Radaranwendungen sowie Kommunikationsanwendungen im Frequenzbereich 94 GHz bis 300 GHz nutzen zu können. Abhängig von der Halbleitertechnologie sinkt die effektiv verfügbare Ausgangsleistung mit einer Potenz von 2 – 4 mit der Frequenz. Abb. 2 zeigt den am Fraunhofer IAF bislang erreichten Stand der Technik der Ausgangsleitung über der Frequenz. Die Abbildung reflektiert dabei auch den Bedarf an neuartigen Leistungsverstärkern jenseits der 100 GHz.

Anwendungen

Die Verfügbarkeit von leistungsfähigen mm-Wellen-Leistungsverstärkern wird neue Radarsysteme und fortschrittliche kompakte Sensoren ermöglichen. Durch die kleine Wellenlänge können die Sensoren sehr klein werden

bzw. einen sehr kleinen Formfaktor erreichen in der Form von integrierten Modulen mit weniger als 1 cm³ Volumen. Mit Frequenzmodulierten kontinuierlichen (FMCW)-Radaren können sehr genaue geometrische Informationen über die beobachteten Objekte gewonnen werden. Daher eignen sich diese insbesondere für Sicherheitsanwendungen wie die Detektion von versteckten Bedrohungen.

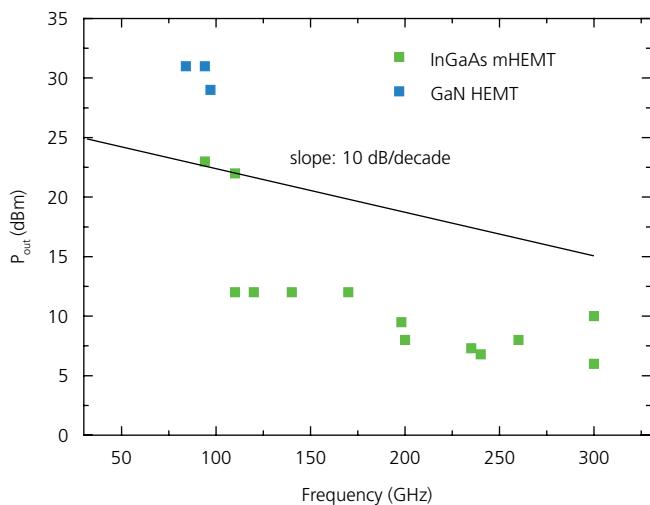
Für synthetische Apertursysteme (SAR) in Drohnen (UAVs) sind die Leistungspegel gegenwärtig nicht ausreichend, um gute beobachtende Radare mit ausreichender Reichweite und damit Flughöhe zu bauen. MIMO-Systeme sind dabei sehr vielversprechende Beispiele für Multifunktionssensoren ohne die Verwendung bewegter Teile. Diese Multikanalsysteme erfordern jedoch hocheffiziente Leistungsverstärker, um lange Einsatzzeiten von Drohnen zu ermöglichen.

Power at 94 GHz (30 dBm).
Leistung bei 94 GHz (30 dBm).

Technological Advances

Both InGaAs-based mHEMT (metamorphic high-electron-mobility transistor) and GaN-based HEMT technologies can be used to generate power in the region of 94 GHz to 300 GHz. Small-signal mHEMT amplifiers exhibit the lowest noise figure, high bandwidth, and high gain due to the good semiconductor material properties. However, InGaAs-based devices suffer from low operating voltage of around 1 V for a typical

gate length below 50 nm, which reduces the output power capability. To overcome this issue, Fraunhofer IAF initiated the development of InGaAs-based MOS-HEMTs in order to increase the breakdown voltage and significantly reduce the gate-related leakage current while preserving the gain capability.



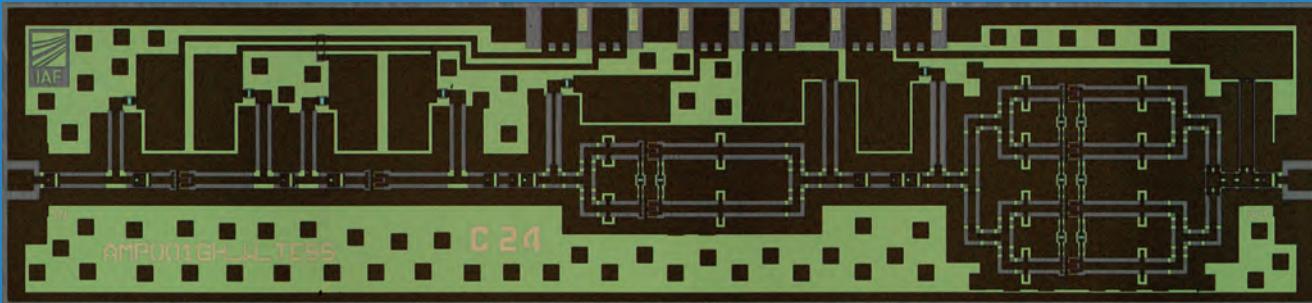
Based on this improved technology, an IC (integrated circuit) can now provide an output power of more than 1 W at 94 GHz. A further amplifier variant achieves power levels of 28 dBm (630 mW), providing about 15 GHz of bandwidth between 80 and 95 GHz.

Referring to the current state of the art, US competitors recently demonstrated GaN MMICs with operating frequencies exceeding 200 GHz and with much higher power densities than those achievable with InGaAs-based devices. Given that even more advanced device technologies with even higher cut-off frequencies and very short gate lengths well below 100 nm have already been developed, it is realistic to envisage GaN power amplifier MMICs with frequencies of up to 300 GHz. Using InGaAs-based HEMT technology, integrated circuits achieving power levels of 7.3 dBm (5.4 mW) can be realized at 245 GHz as shown in Fig. 2. This MMIC features a bandwidth of more than 30 %. These amplifiers are very suitable for high-bandwidth data communication applications in the atmospheric window around 240 GHz. At the edge of sub-mm-wave operation, the highest power currently achieved at 300 GHz is 10 dBm (10 mW) with narrow bandwidth.

- 2 Frequency dependence of the maximum output power achieved at Fraunhofer IAF with mHEMT and GaN technologies to date.
Am Fraunhofer IAF mit mHEMT- und GaN-Technologien erreichte maximale Ausgangsleistungen in Abhängigkeit der Frequenz (zum gegenwärtigen Zeitpunkt).

To date, AlGaN/GaN HEMTs are known for generating RF power from 1 GHz to about 100 GHz. They feature power densities per area far superior to those found in InGaAs-based devices. Recently, Fraunhofer IAF has significantly improved both the gain and power capabilities of GaN MMIC technology with 100 nm gate length. To achieve high power densities, the heterostructure barriers must be made very thin and a high content of aluminum should be used in the barrier layer.

Hetero-integration of GaN-based amplifiers together with InGaAs- and Si/SiGe-based circuits will be the technique of choice in novel module concepts. To close the power gap, Fraunhofer IAF is working with great effort to establish a European GaN technology supply chain in the upper mm-wave range.



3

- 3 *mHEMT power amplifier
MMIC at 245 GHz realized in
50 nm technology.*
*mHEMT-Leistungsverstärker-
MMIC, bei 245 GHz,
realisiert in 50 nm-
Technologie.*

10 mW

*Power at 300 GHz.
Leistung bei 300 GHz.*

Fortschritte in der Technologie

Sowohl InGaAs-basierte mHEMTs als auch GaN-HEMT-Technologien können zur Leistungserzeugung zwischen 94 – 300 GHz genutzt werden. Kleinsignal-mHEMT-Verstärker zeigen die niedrigste Rauschzahl, die höchste Bandbreite und die größte Verstärkung auf Basis der Halbleitereigenschaften. InGaAs-Bauelemente leiden jedoch unter einer niedrigen Betriebsspannung, welche die Ausgangsleistung reduziert. Daher werden gegenwärtig InGaAs-MOS-HEMTs zur Steigerung der Durchbruchsspannung entwickelt, die unter Beibehaltung der Verstärkungseigenschaften auch die Leckströme reduzieren. AlGaN/GaN-HEMTs sind bisher bekannt zur HF-Leistungserzeugung von 1 GHz bis ca. 100 GHz. Die erreichten Flächenleistungsdichten der integrierten Schaltungen (ICs) sind dabei denen der InGaAs-Bauelemente weit überlegen. Im letzten Jahr hat das Fraunhofer IAF die Verstärkungs- und Leistungseigenschaften bei hohen Frequenzen der GaN-MMIC-Technologie mit 100 nm signifikant verbessert. Um dies zu erreichen, müssen dünne Barrieren in den Heterostrukturen mit hohen Aluminium-Gehalten in der Barriere kombiniert werden. Auf Basis dieser verbesserten Technologie sind nun ICs mit einer Ausgangsleistung von 1 W bei 94 GHz möglich. Ein weiterer Verstärker erreicht 28 dBm (630 mW) über eine Bandbreite von 15 GHz zwischen 80 und 95 GHz. US-Forscher erreichten jüngst GaN-MMICs mit 200 GHz Betriebsfrequenz mit stark gesteigerten Leistungsdichten gegenüber InGaAs-Bauelementen. Gleichzeitig wurden jüngst

Einzelbauelemente mit noch höheren Frequenzen und sehr kurzen Gatelängen unterhalb 100 nm nachgewiesen, so dass die Realisierung von GaN-MMICs bis 300 GHz möglich ist. Mit InGaAs-HEMT-Technologien können heute integrierte Schaltungen mit Ausgangsleistung von 7,3 dBm (5,4 mW) bei 245 GHz realisiert werden (Abb. 2). Dieser MMIC erreicht Bandbreiten von mehr als 30 %. So ein Verstärker ist besonders geeignet für breitbandige Datenkommunikationslinks im atmosphärischen Fenster bei 240 GHz. An der Grenze zur Sub-Millimeterwelle ist die höchste Leistung, die mit mHEMT erreicht wird, etwa 10 mW (10 dBm) in einer schmalbandigen Realisierung. Solche Schaltungen können heute Gunn-Oszillatoren im höchstauf lösenden Radaren ersetzen. Um die Leistungslücke jenseits der 100 GHz zu füllen, stehen sowohl InGaAs- als auch GaN-basierte Technologien im Wettbewerb mit den jüngsten InP-Bipolartechnologien. Die Verfügbarkeit von neuen mm-Wellen-Leistungsquellen wird neue Radar- und Kommunikationsanwendungen erschließen.

Weitere Fortschritte können durch die Skalierung der Technologie und neue Bauelementkonzepte wie III-V-MOSFET erwartet werden. Die Heterointegration von GaN-basierten Verstärkern mit InGaAs- und Si/SiGe-Schaltungen ist interessant für neue Modulkonzepte, da der Leistungsverstärker immer die jeweils beste Leistungsfähigkeit erfordert. Um die Leistungslücke zu schließen, ist das Fraunhofer IAF bemüht, eine europäische Versorgungskette der GaN-Technologie zu etablieren.



Charge Control of Single NV Centers in Diamond

Christoph Nebel – christoph.nebel@iaf.fraunhofer.de

The control of the charge state of a single nitrogen-vacancy (NV) center is demonstrated by use of an in-plane Schottky-diode structure manufactured on hydrogen-terminated ultra-pure diamond. Single NV centers are generated in the depletion layer through the implantation of N atoms. By using an applied external reverse voltage, the band bending in the depletion region can be manipulated to change the charge state of the NV center. The charging/discharging properties pave the way towards new quantum-based data storage and processing technology.

- 1 Hard disk drive: Write/read head and magnetic disk.
Geöffnete Festplatte: Schreib-Lesekopf und Magnetscheibe.

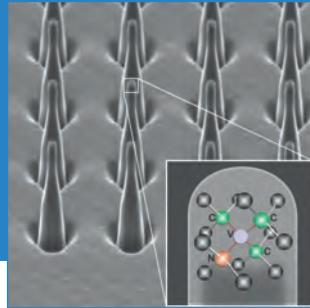
Quantum Properties of NV

The precise measurement of physical quantities is a key driving force in natural science and the basis for most technological advances. Quantum sensors based on the negatively charged nitrogen-vacancy (NV) center in diamond are therefore attracting increasing attention as NV spin probes have already been shown to sense a variety of quantities such as magnetic and electric fields, temperature, pressure, and force. The NV center has, however, three charge states and is located 2.94 eV above the valence band maximum (Fig. 1). Two electrons are unpaired, forming an electron spin triplet state, the degeneracy of which is lifted by spin-spin interaction into a singlet state $m_s = 0$ and a doublet state $m_s = \pm 1$, separated by 12 μeV (2.88 GHz) in the absence of a magnetic field. Owing to symmetry, the $m_s = \pm 1$ sublevels are degenerate at zero magnetic field. External

magnetic fields lift the degeneracy, leading to the appearance of two luminescence emission lines that are used for quantum magnetometry. If optically excited, the NV center shows a characteristic photoluminescence (PL) spectrum with a zero phonon line (ZPL) at 637 nm and strong phonon-assisted sidebands (Fig. 2). If one of the electrons is removed, a neutral NV^0 center is generated and is located at 1.2 eV above EV. This center shows no magnetic field effects and has a PL spectrum with a ZPL at 575 nm with strong Stokes-shifted vibronic side bands (Fig. 2). Removing a second electron, the center becomes positively charged (NV^+) and shows no PL.

In-plane Gate Transistor

To control the charge state of single NV centers, we created in-plane gate Schottky diode structures using aluminum as the



- Diamond
 - NV center
 - Quantum technology
 - NV charge control
 - Magnetometry
 - In-plane Schottky diode

NV-Zentren in Diamant: Kontrolle des Ladungszustands

Der Ladungszustand eines einzelnen Stickstoff-Leerstellen (NV)-Zentrums kann durch Verwendung einer in-plane Schottky-Diodenstruktur kontrolliert werden, die auf einem mit Wasserstoff terminierten, ultrareinen Diamanten hergestellt wird. Einzelne NV-Zentren werden in der Verarmungsschicht durch Implantation von N-Atomen erzeugt. Durch Verwendung einer angelegten externen Sperrspannung kann die energetische Position des NV-Zentrums im Verarmungsbereich manipuliert und der Ladungszustand des NV-Zentrums verändert werden. Die Lade- und Entladungseigenschaften können einen neuen Weg zur quantenbasierten Datenspeicherung und Prozesstechnologie bieten.

$$2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

Quantenphysikalische Eigenschaften des NV-Zentrums

Die genaue Messung von physikalischen Größen ist eine der treibenden Kräfte in den Naturwissenschaften und die Grundlage für jeden technologischen Fortschritt. Die Quantenphysik legt eine Höchstgrenze

Single NV center in für die Genauigkeit der Messungen fest.
 $2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ atoms. Quantensensoren auf der Grundlage des

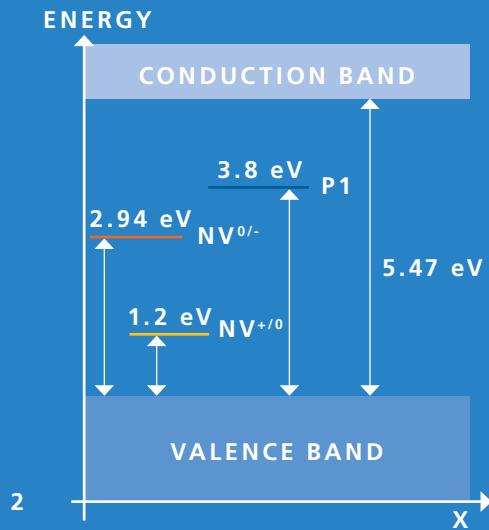
Expected magnetic field sensitivity: $10^{-10} \text{ THz}^{-0.5}$. negativ geladenen Stickstoff-Leerstellen (NV)-Zentrums im Diamant erhalten immer

Ein NV-Zentrum in $2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ Atomen

*Erwartete magnetische
Empfindlichkeit: $10^{-10} \text{ THz}^{0.5}$.*

Größen, wie magnetische und elektrische Felder, Temperatur und Druck sowie Kraft, erfassen können. Das NV-Zentrum hat drei Ladezustände und liegt 2,94 eV oberhalb des Valenzbandmaximums. Zwei Elektronen sind ungepaart und bilden einen Elektronen-spin-Triplet-Grundzustand, dessen Degeneration durch Spin-Spin-Wechselwirkung in

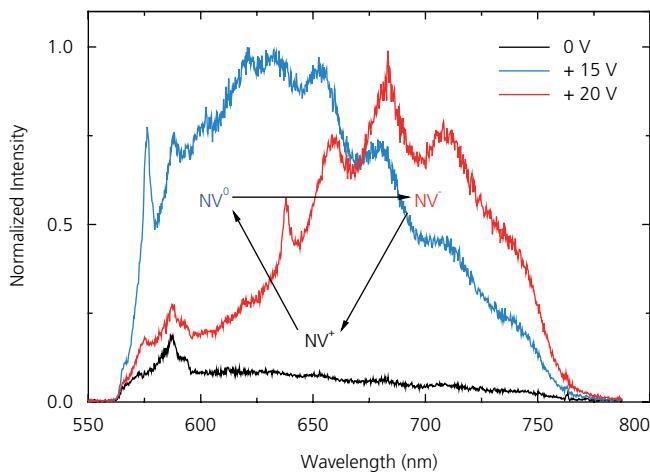
einen Singulett-Zustand $m_s = 0$ und einen Dublett-Zustand $m_s = \pm 1$ – getrennt durch 2,88 GHz in Abwesenheit eines Magnetfeldes – aufgehoben wird. Aufgrund der Symmetrie sind die $m_s = \pm 1$ Zustände des NV-Zentrums bei keinem externen Magnetfeld degeneriert, was zu einer einzigen Resonanzlinie in der optisch detektierten magnetischen Resonanz-Messung (ODMR) führt. Ein externes Magnetfeld hebt die Entartung von $m_s = \pm 1$ auf. Nun sind zwei Linien detektierbar. Dieses Zentrum zeigt eine charakteristische Photolumineszenz, die in Abb. 2 gezeigt wird. Bei 637 nm wird eine Nullphononen-Linie (ZPL) des negativ geladenen NV-Zentrums mit einer starken Phononen-induzierten Seitenbande beobachtet. Wird ein Elektron entfernt, entsteht ein neutrales NV⁰-Zentrum mit einem Zustand, der 1,2 eV über EV liegt. Dieses Zentrum weist jedoch keine magnetischen Feldeffekte auf. Das Spektrum zeigt eine



- 2 The NV center's energy level scheme for different charge states. The nitrogen defect state (P1) is also shown.**
Das Energieschema des NV-Zentrums für verschiedene Ladungszustände. Ebenfalls gezeigt ist der Stickstoffdefektzustand (P1).

Schottky contact on H-terminated diamond. Single NV centers were generated in the vicinity of the Schottky contact by means of nitrogen implantation close to the Al contact in combination with thermal annealing. At zero bias voltage no photoluminescence can be detected. However, applying a reverse potential of +15 V gives rise to the appearance of the photoluminescence of a single NV⁰ center (Fig. 3), which becomes negatively charged (NV⁻) at +20 V. The PL properties of a single NV center as a function of charge state are shown in Fig. 2. To measure the dynamics of charging/discharging we applied pulsed reverse electric fields to the Al contact. The result is summarized in Fig. 4. The electron emission from NV⁻ or NV⁰ takes place within 10 ns, while the formation of NV⁰ and NV⁻ from NV⁺ requires 100 ns and 330 ns respectively.

- 3 Photoluminescence spectra of a single NV center in its three different charge states. The peak at 587 nm is due to second-order Raman scattering.**
Photolumineszenzspektren eines einzelnen NV-Zentrums in seinen drei unterschiedlichen Ladungszuständen. Die Linie bei 587 nm ist durch Raman-Streuung zweiter Ordnung bedingt.

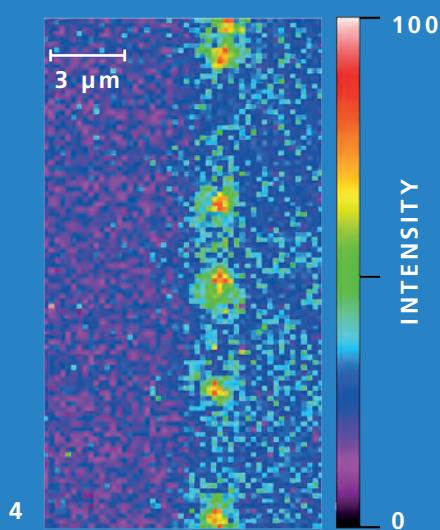


of a PL spectrum arising from the neutral NV⁰ center, followed by the PL spectrum of the NV⁻ center at higher reverse potential.

Using the planar Schottky diode device therefore enables the charge state of a single NV center to be stabilized or changed, so that the extraordinary optical and spin properties can be used for many quantum physical applications. In addition, by switching from NV⁰ to NV⁺ and vice versa, it opens the door to quantum storage applications. In a quantum memory, the electron spin information relating to the NV⁻ center, which has a limited phase coherence time, can be transferred to a long-living nuclear spin (¹³C). After the spin transformation, the electron will be removed to form NV⁺. To read out the nuclear spin, the NV⁺ is transferred again to NV⁻ by electron injection and the nuclear spin is then transferred to the electron spin again, which can be used for further data processing. For the processing, storage, optical manipulation, and read out of quantum information, switching between NV⁻ and NV⁺ is therefore a key requirement that paves the way towards new data processing and memory technologies.

Acknowledgement

Please note that this research has been performed in close collaboration with the team led by Jörg Wrachtrup, University of Stuttgart, and Jan Meijer University of Leipzig. The details have been published in a) *Beilstein J. Nanotechnol.* 2016, 7, 1727–1735, b) *Scientific Reports* Vol. 5, Article Nb. 12160, 2015, and c) *Scientific Reports* Vol. 4, Article Nb. 3634, 2014.



4 Spatial map of single NV centers (red-yellow spots) as detected in the depletion region of the Al contact for a reverse potential of +15 V.
Räumliche Abbildung einzelner NV-Zentren (rot-gelbe Punkte), wie sie im Verarmungsreich des Al-Kontakts für eine Sperrspannung von +15 V nachgewiesen wurden.

ZPL bei 575 nm, mit ebenfalls starken Stokes verschobenen vibronischen Seitenbändern. Schließlich wird durch Entfernung eines weiteren Elektrons das Zentrum positiv geladen (NV^+). Dieser Zustand zeigt keine Photolumineszenz.

In-plane Gate Transistor

Durch Variation des Fermi-Niveaus in Bezug auf die NV-Energien kann eine Einstellung des Ladungszustands durch Elektroden erreicht werden. Am Fraunhofer IAF wählten wir eine Schottky-Diodenstruktur, wie in Abb. 3 dargestellt, wobei Aluminium als Schottky-Metall auf H-terminiertem Diamant gewählt wurde. Als Ohm'scher Kontakt wurde Au genutzt. Durch eine Stickstoffimplantation nahe dem Al-Kontakt in Kombination mit einer Temperung bei 800 °V in Vakuum wurden dann NV-Zentren erzeugt. Liegt keine Spannung am Al-Kontakt an, kann keine Photolumineszenz detektiert werden. Wird eine zunehmend größere Sperrspannung angelegt, z. B. +15 V, kann das leuchtende NV^+ beobachtet werden. Bei Sperrspannungen um die 20 V wird das NV^+ Zentrum in NV^- umgeladen.

Die dynamische Ladungszustandsvariation einzelner NV-Zentren, wurde durch Anlegen gepulster Spannungen untersucht und wird in Abb. 3 gezeigt. Die Elektronenemission von NV^- oder die Erzeugung von NV^+ ist jeweils ein zweistufiger Vorgang mit einer intermediären NV^0 -Bildung. Im allgemeinen erfolgt die Elektronenemission innerhalb von 10 ns, während die Bildung von NV^0 und NV^- ausgehend von NV^+ 100 ns bzw. 330 ns benötigt.

Die Schaltphänomene sind in Abb. 2 schematisch dargestellt. Aufgrund der

Bandbiegung am Schottky-Kontakt sind beide NV-Ladungsübergangsniveaus nahe der Oberfläche bei keiner Spannung unbesetzt. Es kann deshalb kein PL detektiert werden. Aufgrund einer Sperrspannung werden die Übergangsniveaus als Funktion der angelegten Spannung kontinuierlich unterhalb des Fermi-Niveaus verschoben, so dass zunächst die NV^0 -Emission und dann bei höheren Sperrspannungen die NV-Emission eintritt.

Die Verwendung dieser in-plane Schottky-Diode ermöglicht es, das NV-Zentrum gezielt einzustellen, sodass dessen außergewöhnliche optischen und Spin-Eigenschaften für viele quantenphysikalische Anwendungen genutzt werden können. Darüber hinaus wird durch die Möglichkeit den Zustand umzuschalten, die Tür zu Quanten-Rechner-Anwendungen geöffnet. In einem Quantencomputer kann der Elektronenspin des NV-Zentrums für die schnelle Informationsverarbeitung und der Spin des z. B. ^{13}C -Nukleus für Langzeitskalainformationsspeicherung verwendet werden. Dies wird den Weg hin zur Realisierung eines skalierbaren Quantencomputers eröffnen.

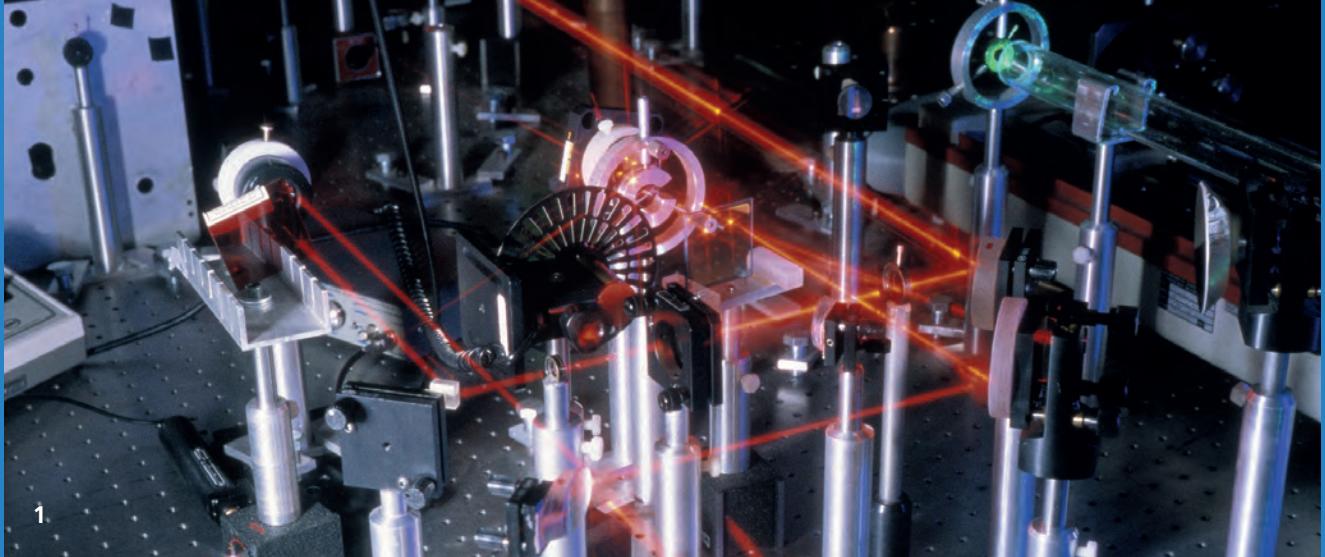
Danksagung

Die Ergebnisse dieser Forschung wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Team von Jörg Wrachtrup (Universität Stuttgart) und Jan Meijer (Universität Leipzig) erarbeitet. Details finden sich in a) Beilstein J. Nanotechnol. 2016, 7, 1727–1735, b) Scientific Reports Vol. 5, Article Nb. 12160, 2015 and c) Scientific Reports Vol. 4, Article Nb. 3634, 2014.

10 – 300
ns

Charging dynamics.

Dynamik der Ladungsveränderung.



Infrared Laser for High-resolution Spectroscopy and Metrology

Marcel Rattunde – marcel.rattunde@iaf.fraunhofer.de

Fraunhofer IAF has developed tunable lasers based on the semiconductor disk laser (SDL) concept for the 2 – 3 μm wavelength range and on quantum cascade lasers (QCL) covering the 4 – 11 μm range. These lasers can be precisely tuned to any specific wavelength (e. g. of a particular absorption line) and feature mode-hop-free fine tuning combined with a large coarse tuning range and a high output power of up to 500 mW. They can be tailored for precise spectroscopic measurements as well as for quantum optical experiments.

- 1 Precision spectroscopy as well as quantum optical experiments calls for tunable, narrow-linewidth high power lasers.**

Für die Quantenoptik sowie die hochauflösende Spektroskopie werden durchstimmbare Leistungslaser mit einer schmalen Linienbreite benötigt.

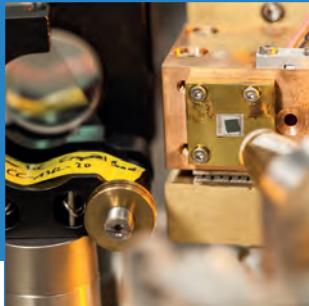
Although distributed feedback (DFB) semiconductor lasers are now widely used for standard spectroscopic measurements such as absorption spectroscopy of gases, many applications demand a wider spectral tuning range (e. g. for multi-species analysis) or higher output power (e. g. for stand-off detection or quantum optics). At the same time, these laser platforms should still facilitate mode-hop-free fine tuning and exhibit a narrow emission linewidth. Due to technological achievements within the last year, Fraunhofer IAF can now offer these platforms in two relevant IR-wavelength regions, drawing on two different semiconductor-based optical gain structures.

Tunable Semiconductor Disk Laser (SDL) for the 2 – 3 μm Range

For high-power operation, a transparent intracavity heat spreader made of SiC or

diamond is currently state of the art for GaSb-based SDLs emitting in the 2 to 3 μm wavelength range. However, the severe drawback of this mounting technology is that the heat spreader also acts as an optical etalon. As a result, at a constant chip temperature, which is the preferred mode of operation for stable single-frequency emission, the heat spreader prevents a tunable setup from reaching emission wavelengths in between the different etalon modes. Omitting the heat spreader could solve this problem, but in such cases the output power is currently limited to approximately 10 mW.

Fraunhofer IAF has developed a new chip-mounting technology for these SDLs that enables high output power without the need for an intracavity heat spreader. This technology facilitates the tunable laser setup shown in Fig. 2. A birefringent filter is used



- Mode-hop-free tunable laser
- Infrared wavelength range
- Spectral tunable semiconductor laser
- Narrow spectral linewidth
- High output power

Infrarotlaser für hochauflösende Spektroskopie und Metrologie

Basierend auf zwei unterschiedlichen Halbleiter-Technologien wurden am Fraunhofer IAF durchstimmbare Laser für den 2 – 3 μm sowie für den 4 – 11 μm Spektralbereich entwickelt. Die Laser können präzise auf jede beliebige Wellenlänge, z. B. einer spezifischen Absorptionslinie, eingestellt werden und zeichnen sich durch eine hohe Ausgangsleistung von bis zu 500 mW sowie eine schmalen Linienbreite aus. Die Laser finden Anwendung in der hochauflösenden Spektroskopie sowie der Quantenoptik.

< 0.0001
cm⁻¹

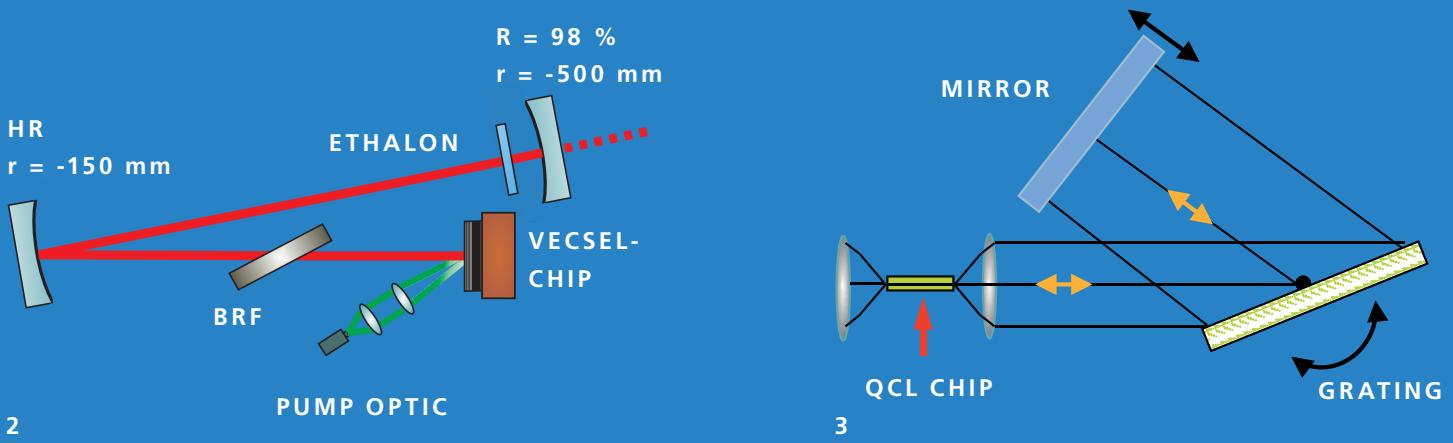
*Spectral linewidth of a tunable 2 μm SDL.
Spektrale Linienbreite eines 2 μm Halbleiter-scheibenlasers.*

Für einfache spektroskopische Messungen, wie der Absorptionsspektroskopie einzelner Gaslinien, haben sich mittlerweile »distributed feedback« (DFB)-Halbleiterlaser etabliert, die jedoch in ihrer Emissionswellenlänge auf einen sehr kleinen Spektralbereich begrenzt sind. Viele Anwendungen benötigen hingegen einen größeren spektralen Durchstimmungsbereich, z. B. bei der Multikomponenten-Analyse. Oder sie benötigen höhere Ausgangsleistungen, z. B. in quantenoptischen Experimenten. Gleichzeitig sollen die vom DFB-Laser bekannten Eigenschaften, schmale Linienbreite sowie modensprung-freies Durchstimmen in einem begrenzten Wellenlängenbereich, beibehalten werden. Durch technologische Fortschritte im Bereich der Halbleiter-Scheibenlaser (semiconductor disk laser, SDL) für den 2 – 3 μm , sowie des Quantenkaskadenlaser (QCL) für den 4 – 11 μm Wellenlängenbereich kann das

Fraunhofer IAF nun Laser-Plattformen in zwei relevanten Wellenlängenbereichen anbieten, die die obigen Vorgaben erfüllen.

Durchstimmbare Halbleiter-Scheibenlaser (SDL) für den 2 – 3 μm Bereich

Um eine hohe Ausgangsleistung der GaSb-basierten SDLs sicherzustellen, werden nach bisherigem Stand der Technik resonator-interne Wärmespreizer aus SiC- oder Diamant verwendet. Der Nachteil dieser Technologie ist, dass die Wärmespreizer gleichzeitig als Etalon wirken. Ein durchstimmbarer, schmalbandiger SDL, dessen Chip-Temperatur aus Stabilitätsgründen konstant gehalten werden muss, kann damit keine Emissionswellenlängen zwischen den einzelnen Etalon-Moden erreichen. Betreibt man die SDL ohne Wärmespreizer, so war die Ausgangsleistung bisher auf 10 mW begrenzt.



2 Schematic diagram of the tunable SDL resonator.

Aufbau des durchstimmbaren Halbleiter-Scheibenlasers (SDL).

3 Schematic diagram of a mode-hop-free tunable EC-QCL setup.

Schematischer Aufbau des QCL-Resonators, mit dem ein modensprungfrei-durchstimmbarer Betrieb erreicht wurde.

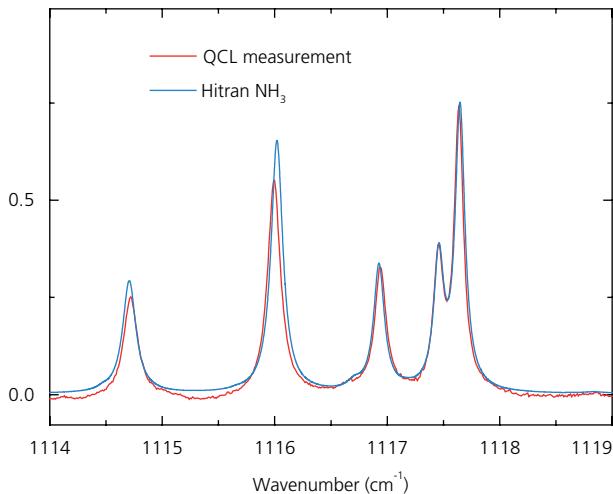
for coarse tuning of the emission wavelength at around 150 cm^{-1} . Single-frequency emission is ensured by a tiltable etalon inside the laser cavity. Mode-hop-free fine tuning can be achieved by changing the cavity length with a piezo-mounted end mirror, resulting in a mode-hop-free tuning range on the order of 1 GHz (or 0.03 cm^{-1}). With this setup, any arbitrary wavelength within the tuning range of the gain chip is accessible at a constant chip temperature. At the same time, this

resonator reaches a high output power of 500 mW (at the central emission wavelength) in single-frequency operation with an emission linewidth below 3 MHz (or 0.0001 cm^{-1}). These combined features make the SDL setup a unique laser system for cw-LIDAR

side facets acting as plan-parallel mirrors. With a typical chip length of 2 mm , this results in mode spacing and consequential mode hops, of around 0.75 cm^{-1} when tuning the laser. To improve on this, a Littman-Metcalf-type external resonator was designed (shown schematically in Fig. 3) that exhibits a higher spectral resolution compared with the standard Littrow configuration. Moreover, the anti-reflection coating on the intracavity out-coupling facet of the QCL chip was improved and the QCL was operated in continuou-wave (cw) mode. For a large mode-hop-free tuning range, the rotation of the mirror was synchronized with the change in the cavity length.

The ability for mode-hop-free tuning of this improved QCL setup was demonstrated by measuring absorption peaks of ammonia (NH_3) as shown in Fig. 4. This absorbance trace (red line) shows excellent agreement with the reference spectra from the HITRAN database (blue line) and no mode hops within this 150 GHz (5 cm^{-1}) wavelength scan. The output power of this EC-QCL reaches 100 mW (at the central emission wavelength) in single-frequency operation with a linewidth below 60 MHz (or 0.002 cm^{-1}). The coarse tuning range is around 100 cm^{-1} .

Just like a DFB laser, this QCL setup can resolve spectrally narrow absorption features. However, it exhibits a much larger total tuning range, enabling multi-species analysis with a single laser source. Furthermore, this wider spectral coverage greatly improves the subsequent chemometric analysis, reducing the risk of false correlations.



4 Absorbance measurement of NH_3 with an EC-QCL setup (red line). All features of the different absorption lines are well resolved, and are in excellent agreement with the HITRAN reference spectrum (blue line).

Vergleich der mit dem EC-QCL gemessenen NH_3 -Absorptionslinien (rot) mit dem aus der HITRAN-Datenbank bestimmten Spektrum (blau).

measurements, selective optical pumping of atoms and molecules, and quantum optical experiments.

Mode-hop-free EC-QCL for the

4 – 11 μm Wavelength Range

For longer emission wavelengths well above $3.5\text{ }\mu\text{m}$, quantum cascade lasers (QCL) constitute the most effective semiconductor structure for optical gain. An external grating can be used for wavelength tuning. However, as above, for continuous and smooth tuning, there is an unwanted »etalon« inside this resonator – the QCL chip itself with the

5 Mounted QCL chip with integrated micro lenses.
Mounted QCL-Chip mit integrierten Mikro-Linsen.

< 0.002
cm⁻¹

*Spectral linewidth
of a cw EC-QCL.*
Spektrale Linienbreite
eines cw-EC-QCL.

Am Fraunhofer IAF konnte eine neue Aufbau-technik für die SDL-Chips entwickelt werden, die zum ersten Mal hohe Ausgangsleistungen ohne die Verwendung eines resonatorinternen Wärmespreizers erlaubt. Durch diese Aufbautechnik konnte der in Abb. 2 gezeigte durchstimmbare SDL realisiert werden. Durch die Kombination aus Lyot-Filter und kippbarem Etalon kann bei konstanter Chip-Temperatur jede beliebige Emissionswellenlänge innerhalb des 150 cm^{-1} Durchstimmreiches eingestellt werden. Modensprungfreies Abstimmen im Bereich von 3 GHz (0.03 cm^{-1}) ist durch Veränderung der Resonatorlänge mit Hilfe eines Piezos möglich. Dieser SDL-Resonator erreicht eine hohe Ausgangsleistung von 500 mW (bei der Zentralwellenlänge) im spektral-einmodigen Betrieb mit einer Linienbreite unterhalb von 3 MHz ($0,0001\text{ cm}^{-1}$). Diese Eigenschaften ermöglichen den Einsatz dieses SDLs in cw-LIDAR-Messungen, der präzisen Vermessung von Atom- und Molekülspektren sowie quantenoptischen Experimenten.

Modensprungfreie EC-QCL für den 4 – 11 µm Wellenlängenbereich

Für Emissionswellenlängen oberhalb von $3,5\text{ }\mu\text{m}$ bietet der Quantenkaskadenlaser (QCL) ein effizientes Halbleitermedium für optischen Gewinn. Für die wellenlängenselektive Rückkopplung wird ein optisches Gitter in den QCL-Resonator integriert. Wie im obigen Fall gibt es aber auch in diesem Resonator einen unerwünschten Etaloneffekt, der durch den QCL-Chip selber verursacht wird. Bei einer typischen Chip-Länge von 2 mm ergeben sich so Modensprünge im Abstand von $0,75\text{ cm}^{-1}$. Um diese Einschränkung

aufzuheben, wurde der QCL-Resonator an mehreren Stellen optimiert: So wurde ein Littman-Metcalf-Design verwendet, das gegenüber dem Littrow-Design eine deutlich höhere spektrale Auflösung besitzt. Ferner wurde die AR-Beschichtung der Chipfacette optimiert und der QCL wurde im Dauerstrich (cw)-Modus betrieben. Durch Anpassung der Resonatorlänge synchron zur Drehung des Gitters, konnte der kontinuierliche Durchstimmbereich maximiert werden. In Abb. 4 sind mehrere NH_3 -Absorptionslinien gezeigt (rote Linie), die mit Hilfe des neuen EC-QCL gemessen wurden. Der Vergleich mit den Daten aus der HITRAN-Datenbank (blaue Linie) zeigt eine hervorragende Übereinstimmung und damit auch, dass der Laser über diese 150 GHz (5 cm^{-1}) modensprungfrei abgestimmt werden kann. Die Ausgangsleistung beträgt 100 mW (bei der Zentralwellenlänge) im spektral-einmodigen Betrieb mit einer Linienbreite unterhalb von 60 MHz ($0,002\text{ cm}^{-1}$). Der gesamte Durchstimmbereich des EC-QCLs liegt bei 100 cm^{-1} .

Im Vergleich zu einem DFB-QCL bietet der hier vorgestellte EC-QCL ebenfalls die Möglichkeit, spektral schmale Absorptionslinien genau aufzulösen, allerdings mit dem Vorteil eines viel größeren maximalen Durchstimmreichs. Dadurch kann mit nur einer Laserquelle ein Gemisch aus verschiedenen Substanzen analysiert werden (Multikomponenten-Analyse). Weiterhin wird durch die Erfassung eines breiten Spektralbereichs die nachfolgende chemometrische Auswertung deutlich einfacher und robuster und reduziert so die Gefahr von Falschalarmen deutlich.



1

Infrared Detectors for Single Photons

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

Single-photon detection is a challenging and important task for the upcoming use of quantum technologies and can be achieved by operating avalanche photodiodes above the breakdown voltage. In this so-called Geiger mode, the absorption of a single photon can trigger an avalanche multiplication process, resulting in a macroscopic current pulse that is easy to measure. Detectors for single infrared photons can be used in quantum communication or for range-gated viewing over large distances.

1 Fiber-based telecommunication systems with quantum encryption benefit from single-photon detectors.

Lichtleitfaser basiertes Telekommunikationssystem: Einzelphotonen-Detektoren für die quantenkryptographische Verschlüsselung.

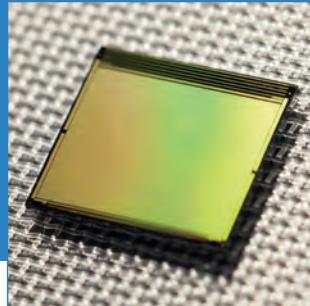
The straight forward method of detecting light is to convert light energy into a voltage output using a photodiode together with a transimpedance amplifier. In such a configuration, the voltage output is directly proportional to the light intensity and the lowest light level detectable is equal to the output from the amplifier corresponding to the noise of the detector/amplifier combination. At high bandwidths, the amplifier noise is the dominant source.

Avalanche Photodetectors

One way to mitigate the noise contribution of the amplifier is by utilizing the internal gain provided by avalanche photodiodes (APDs). An APD is a semiconductor junction diode where the internal electric field caused by a relatively high bias voltage leads to an avalanche multiplication process due to the impact ionization of charge carriers. Ordinary APDs are biased slightly below the breakdown

voltage. This kind of operation is called linear mode since the input power produces an output that is directly proportional to the input light intensity. In photon counting mode (Geiger mode), one photon detected generates a macroscopic output pulse that is counted. In contrast with standard APDs, such a single photon avalanche diode (SPAD) is biased above the breakdown voltage.

At a defined overvoltage, i. e. voltage above the breakdown voltage, the electric field within the depleted region of the device is extremely high. This means that the absorption of a single photon and subsequent injection of the charge carrier into the junction triggers a self-sustaining multiplication process, where an avalanche current of several mA flows through the junction. The avalanche current must be quenched before a subsequent photon can be detected. This is accomplished by lowering the SPAD bias



- Short-wave infrared
- Single-photon avalanche diodes
- Geiger mode
- Quantum communication
- Gated viewing, time of flight

Infrarot-Detektoren für einzelne Photonen

Die Detektion einzelner Photonen ist eine herausfordernde und doch wichtige Aufgabe für die zukünftige Nutzung von Quantentechnologien. Beim Betrieb einer Avalanche-Photodiode oberhalb ihrer Durchbruchspannung löst die Absorption eines einzelnen Photons einen Lawinenverstärkungsprozess aus, was in Form eines makroskopischen Stromimpulses gemessen werden kann. Detektoren für einzelne Photonen im Infraroten eröffnen Anwendungsfelder wie beispielsweise die Quantenkommunikation oder die entfernungsabhängige Bildgebung über große Distanzen.

3.8

Gain factor for

640 x 512 pixel SWIR

APD camera in linear mode.

*Linearer Verstärkungsfaktor
einer SWIR-APD-Kamera mit
640 x 512 Bildpunkten.*

Die einfachste Methode zur Licht-Detektion besteht in der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Spannung durch Verwendung einer Photodiode zusammen mit einem Transimpedanz-Verstärker. Die geringste nachweisbare Lichtintensität entspricht einem Ausgangssignal, das genauso groß ist, wie das Rauschen des Detektor-Verstärker-Systems.

Avalanche-Photodetektoren

Eine Möglichkeit, den Rauschbeitrag des Verstärkers zu minimieren, ist die Nutzung des internen Verstärkungseffekts einer Avalanche-Photodiode (APD). Eine APD besteht aus einer Halbleiterdiode, in der das elektrische Feld resultierend von den relativ hohen angelegten Sperrspannungen mittels Stoßionisation zu einer Lawinenmultiplikation von beweglichen Ladungsträgern führt. Üblicherweise werden APDs etwas unterhalb der Durchbruchspannung betrieben. Diese Betriebsart wird auch

als linearer Modus bezeichnet, weil sich das Ausgangssignal direkt proportional zur eingeschalteten Eingangsintensität verhält. Im Gegensatz dazu wird eine Einzelphotonen-Avalanche-Photodiode (Single Photon Avalanche Diode, SPAD) im sogenannten Geiger-Modus, d. h. oberhalb der Durchbruchspannung betrieben. Dabei ist das elektrische Feld innerhalb der Verarmungszone der APD derart hoch, dass die Absorption eines einzelnen Photons und die anschließende Injektion des generierten Ladungsträgers in den pn-Übergang einen sich selbsterhaltenden Lawinen-Vervielfältigungsprozess auslöst, aufgrund dessen Stromstärken im Bereich einiger mA fließen. Der Durchbruchstrom muss zuerst wieder unterbunden werden (Quenching), bevor ein weiteres Photon detektiert werden kann. Dies wird durch ein kurzzeitiges Absenken der an der SPAD angelegten Spannung unterhalb der Durchbruchspannung und das anschließende



2 Live image of a 640×512 InGaAs APD camera operated at a linear gain factor of 3.8.

Aufnahme mit einer InGaAs-APD-Kamera im Format 640×512 , betrieben bei einem linearen Verstärkungsfaktor von 3,8.

voltage below breakdown and then resetting it to its overvoltage using passive or active electronic feedback circuits. The time it takes to reset the SPAD to its overvoltage is known as the »dead time«, since during this period the SPAD cannot detect any incoming photon.

Quantum Communication

A lot of effort has been made to develop InGaAs APDs for telecommunication applications in the short-wave infrared (SWIR) range between 0.9 and 1.7 μm . Over the last couple of years, developments in low-noise InGaAs

APDs have been presented for both linear-mode and Geiger-mode operation. Passive quenching methods lead to long dead times of more than 200 ns, which is undesirable given the demand for high data rates in telecommunication applications. SPADs are nevertheless essential

for quantum-encrypted communication systems, which call for high photon detection efficiencies, low dark count rates, and fast active quenching circuits with low dead times.

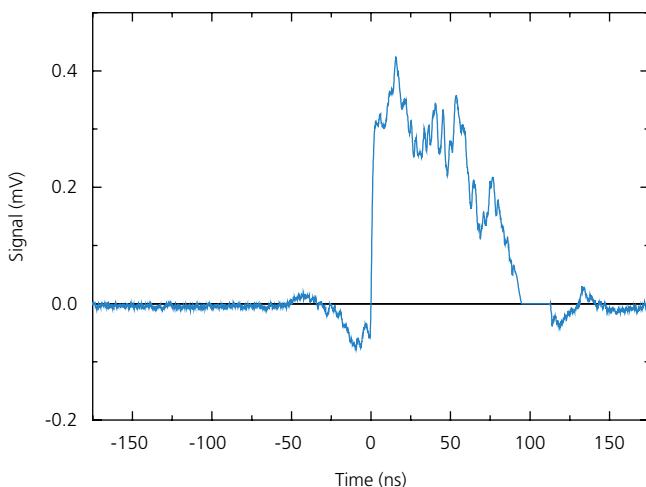
Gated Viewing

Another application for SPADs is range-gated viewing, an imaging technique that makes use of the time of flight of emitted SWIR photons that are scattered back from the

illuminated scene and captured by a suitable camera. Due to the typically high attenuation losses along the light path, the photon flux incident on the camera detector might be so low that the use of SPADs becomes mandatory. Here, the rather low repetition rates of the illuminating pulsed laser system allow for passive quenching with long dead times far above 1 μs or – instead – gating techniques, i. e. operating the SPAD for defined time periods above and below breakdown voltage in a repetitive way. Two-dimensional SWIR SPAD arrays with between 32×32 and 128×32 pixels are already available in the USA.

Current Research at Fraunhofer IAF

Over the last year, we have developed InGaAs APD detector arrays with 640×512 pixels with a pitch of 15 μm . Together with our industrial partner AIM Infrarot-Module GmbH, we were able to successfully demonstrate high-resolution SWIR imaging in the linear mode with a gain factor of 3.8 (Fig. 2). The SWIR APD camera features a high homogeneity without blooming or dead row/column artifacts, a relatively low operating voltage of 21 V, and an operating temperature of up to 260 K. To date, the characterization setup in our lab is capable of detecting pulses comprising roughly 2000 photons when the InGaAs APD is operated in gated mode. Fig. 3 shows an example of a transient photo signal of a sub-ns laser pulse containing approximately 5500 photons within a 150 ns gate interval. We are currently in the process of expanding our ability to characterize InGaAs SPADs.



3 Measured transient photo signal of a sub-ns laser pulse containing approx. 5500 photons within a 150 ns gate interval.

Gemessenes Photosignal eines Sub-ns-Laserimpulses mit etwa 5500 Photonen innerhalb eines Zeitfensters von 150 ns.

2000 photons/ pulse

*Minimum photon flux
detectable to date.*

*Bislang minimaler nach-
weisbarer Photonenfluss.*

Wiederanlegen der Überspannung oberhalb des Durchbruchs mittels passiver oder aktiver elektronischer Rückkoppelschaltkreise bewerkstellt. Die nötige Zeit bis zur Wiederherstellung der Überspannung an der SPAD wird als Totzeit bezeichnet, da innerhalb dieser Zeitspanne keine eingestrahlten Photonen in der SPAD detektiert werden können.

Quantenkommunikation

Viele Bestrebungen zielen bereits auf die Entwicklung von InGaAs-APDs für Anwendungen in der Telekommunikation im Wellenlängenbereich des kurzweligen Infrarot (SWIR) zwischen 0,9 und 1,7 µm. In den vergangenen Jahren wurden InGaAs-APDs mit geringem Rauschen sowohl für den Betrieb im linearen wie auch im Geiger-Modus gezeigt. Methoden zum passiven Quenching bewirken relativ lange Totzeiten von über 200 ns, was für den Bedarf hoher Datenübertragungsraten bei der Telekommunikation unerwünscht ist. Jedoch sind SPADs unentbehrlich für quantenkryptographisch gesicherte Kommunikationssysteme, bei denen großer Wert auf eine hohe Photodetektionseffizienz, eine geringe Dunkelzählrate und kurze Totzeiten gelegt wird.

Entfernungsauflöste Bildgebung

Eine weitere Anwendung von SPADs stellt die entfernungsauflöste Bildgebung dar. Dieses Bildgebungsverfahren nutzt die Laufzeit der Photonen zwischen der Emission von einer gepulsten SWIR-Strahlungsquelle, der Reflexion, bzw. Streuung in der beobachteten Szene und der Erfassung mit einer geeigneten Kamera. Aufgrund der typischen hohen Dämpfungsverluste entlang des Strahlengangs ist der mit

der Kamera zu erfassende Photonenfluss mitunter so gering, dass hierfür die Verwendung von SPADs unerlässlich ist. Dabei tolerieren die eher geringen Pulswiederholraten des Laser-Beleuchtungssystems auch passives Quenching oder – stattdessen – Gating-Verfahren (Gated Viewing), d. h. der sich periodisch wiederholende Betrieb der SPAD ober- und unterhalb der Durchbruchsspannung für jeweils definierte Zeitspannen. In den USA sind SPAD-Bildfeldmatrizen für das SWIR mit 32 x 32 und 128 x 32 Bildpunkten verfügbar.

Aktuelle Forschung am Fraunhofer IAF

Im vorigen Jahr wurden am IAF InGaAs-APD Bildfeldmatrizen mit 640 x 512 Bildpunkten entwickelt. Zusammen mit unserem Industriepartner AIM Infrarot-Module GmbH wurde die hochauflösende Bildgebung im SWIR im linearen Modus mit einem Verstärkungsfaktor von 3,8 erfolgreich demonstriert, siehe Abb. 2. Die SWIR-APD-Kamera zeichnet sich durch eine hohe Bildhomogenität ohne Anzeichen eines Überbelichtungseffekts (Blooming) oder Zeilen-/Spaltenausfällen, eine relativ geringe Betriebsspannung von 21 V und eine Betriebstemperatur von bis zu 260 K aus. Bislang ist die messtechnische Ausstattung unseres Labors dazu geeignet, SWIR-Impulse mit etwa 2000 Photonen mittels InGaAs-APDs im Gating-Betrieb nachzuweisen. Abb. 3 zeigt die beispielhafte Messung des Photosignaltransienten eines sub-ns-Laserimpulses mit etwa 5.500 Photonen innerhalb eines Gatterintervalls von 150 ns. Die Fähigkeiten zur messtechnischen Charakterisierung von InGaAs-SPADs werden derzeit ausgebaut.



Research for the Future

Ausbau der Kernkompetenzen
für zukünftige Innovationen

68 WAFER-SCALE GRAPHENE

Graphenbeschichtung auf Waferskala

72 X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF WIDE-BANDGAP SEMICONDUCTORS

Röntgenbeugungsanalyse an Halbleitern mit großer Bandbreite

80 AlScN – DEVELOPMENT OF NOVEL PIEZOELECTRIC MATERIALS

AlScN – Entwicklung neuartiger piezoelektrischer Materialien

84 NEW APPROACHES IN CIRCUIT DESIGN

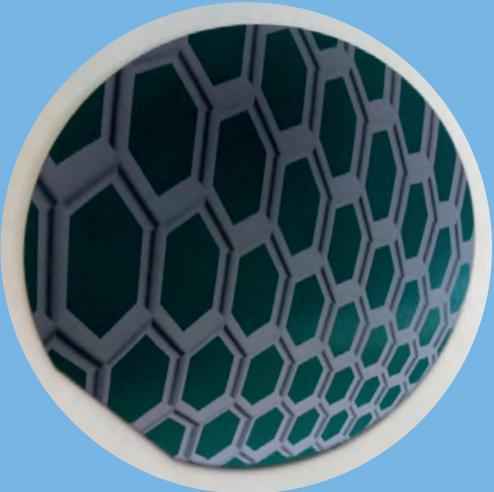
Neue Ansätze für den Schaltungsentwurf

We are using long-term research projects to further strengthen our core competencies, e. g. by widening the basis of materials, such as novel wide-bandgap semiconductors, piezoelectric materials, and graphene (shown as flakes in the background). This also includes further developing the analytical techniques used to characterize these materials. Another example is the development of new concepts for designing radio-frequency and millimeter-wave circuits. These activities lay the foundation for future leading-edge research in electronics and optoelectronics.

In langfristig angelegten Forschungsprojekten entwickeln wir unsere wissenschaftlichen Kernkompetenzen stetig weiter, sei es im Bereich Schaltungsentwurf für die Hochfrequenzelektronik, oder die Entwicklung und Charakterisierung neuer Materialien. Hierzu gehören Halbleiter mit großem Bandabstand, neuartige piezoelektrische Materialien sowie Graphen (im Hintergrund als Flocken zu sehen). Mit diesen Arbeiten wird die Basis geschaffen für zukünftige erfolgreiche Forschung und Entwicklung in der Elektronik und Optoelektronik.



1



Wafer-scale Graphene

René Hoffmann, Volker Cimalla – volker.cimalla@iaf.fraunhofer.de

With graphene at the center of research, 2D materials have entered the realm of materials science. Van der Waals heterostructures open up a new area of scientific research and possible applications. It is therefore important that 2D material interfaces are understood and controlled. Within this scientific framework, we at Fraunhofer IAF are employing our understanding of interfacial energies to solve one of the key challenges facing the use of graphene in microelectronics, namely the creation of wafer-scale graphene coatings.

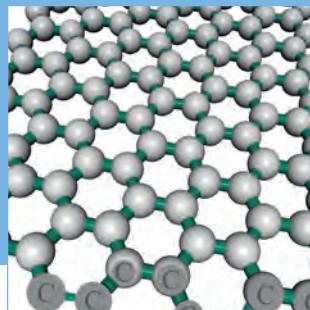
- 1 A wafer of aluminum nitride with a graphene CVD coating.
Aluminiumnitrid-Wafer mit Graphenbeschichtung.

Graphene is the first in a series of 2D materials to be investigated for future applications in microelectronics. The most important long-term objective possibly concerns the use of graphene in 2D material hetero-structures, for example in ultrafast photodetectors or planar light-emitting diodes. Meanwhile, mid-term applications focus on replacement strategies. With a two-dimensional unit cell, zero bandgap, and linear dispersion relation, graphite/graphene breaks with the classic notion that surface effects start to dominate electronic behaviour in films that are thinner than the mean free path of charge carriers. This is described in the Fuchs-Sondheimer semi-classical model. The atypical behavior of graphite, stemming from the monolayer's (graphene's) superior electronic properties, paves the way towards a novel material option in the form of atomically thin conducting layers. These can be used for various applications. At

Fraunhofer IAF, graphene is explored in terms of its implementation as an almost mass-free electrode in electroacoustic resonators or in the shape of transparent conducting layers in photodiodes. Here, as with most potential applications of 2D materials in microelectronics, wafer-scale processing of graphene is an obligatory requirement. As part of the European Graphene Flagship project, Fraunhofer IAF is developing a technology for wafer-scale deposition of graphene on silicon, fused silica, and aluminum nitride.

Chemical Vapour Deposition of Graphene on Thin-film Metals

Our strategy for achieving wafer-scale graphene is to use chemical vapor deposition (CVD) on thin-film metal catalysts. This takes place directly on the target substrate. As opposed to conventional growth on thick metal foils, this allows pure metal catalysts



- Graphene deposition on up to 100 mm diameter wafers
- Graphene on Si/SiO₂
- Graphene on quartz glass
- Graphene on aluminum nitride
- 2D material interfaces

Graphenbeschichtung auf Waferskala

Mit der Forschung an Graphen haben 2D-Materialien Einzug in die Materialwissenschaften erhalten. Van-der-Waals Heterostrukturen aus 2D-Materialien eröffnen neue Forschungsbereiche und Anwendungen. Am Fraunhofer IAF erarbeiten wir ein Verständnis der Grenzflächen zwischen 2D-Materialien und nutzen dieses, um eines der Schlüsselprobleme für die Anwendung von Graphen in der Mikroelektronik zu lösen: die Realisierung von Graphen-Beschichtung auf Waferskala.

303
 Ω/\square

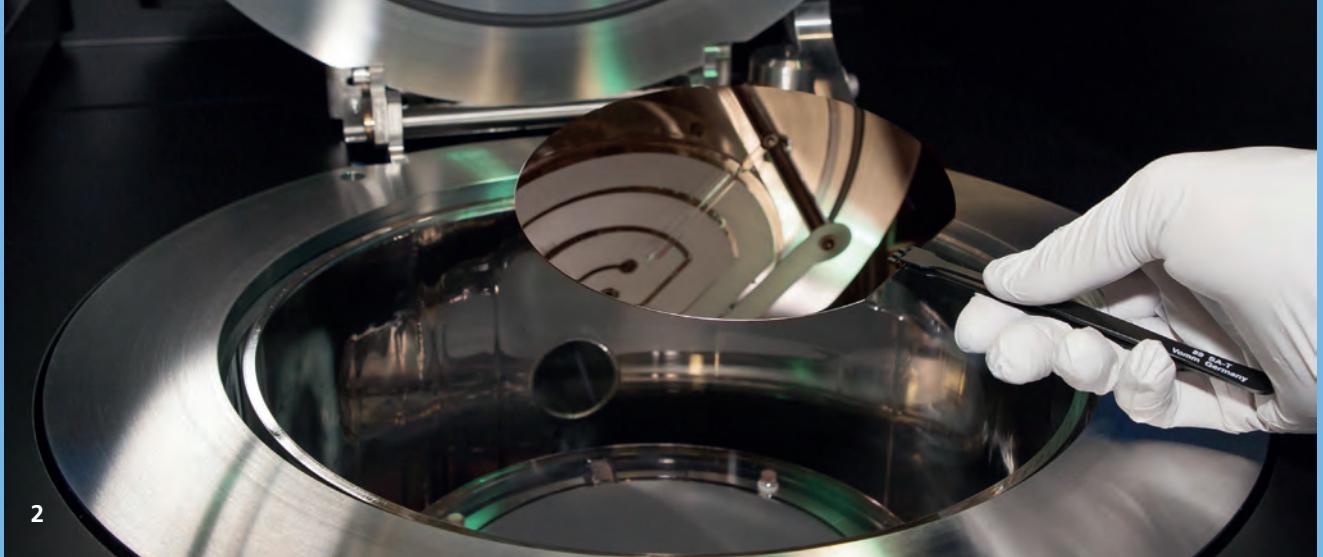
*Sheet resistance of a graphene coating on quartz glass.
 Schichtwiderstand einer Graphenbeschichtung auf Quarzglas.*

Graphen ist das zuerst erforschte Material in einer Reihe von 2D-Materialien, die Anwendungen in der Mikroelektronik finden könnten. 2D-Material-Heterostrukturen könnten sich insbesondere für ultra-schnelle Fotodetektoren oder Leuchtdioden eignen. Bis solche Heterostrukturen Marktreife erlangen, konzentrieren sich die Anwendungen von Graphen noch auf den Ersatz herkömmlicher Materialien. Mit seiner zweidimensionalen Einheitszelle, einer Bandlücke von 0 eV und einer linearen Dispersionsrelation bricht Graphit/Graphen mit der sonst üblichen Beobachtung, dass in sehr dünnen Schichten (dünner als die mittlere freie Weglänge der Ladungsträger) Oberflächeneffekte die elektrischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Semi-klassisch ist dieses Verhalten für den Fall des Schichtwiderstands im Fuchs-Sondheimer-Modell beschrieben. Das atypische Verhalten von Graphit, bei dem eine sehr dünne

Schicht (oder die Monolage Graphen), keine schlechten, sondern sogar besonders gute elektrische Eigenschaften besitzt, schafft eine neue Materialoption für vielfältige Anwendungen: atomar dünne, leitfähige Schichten.

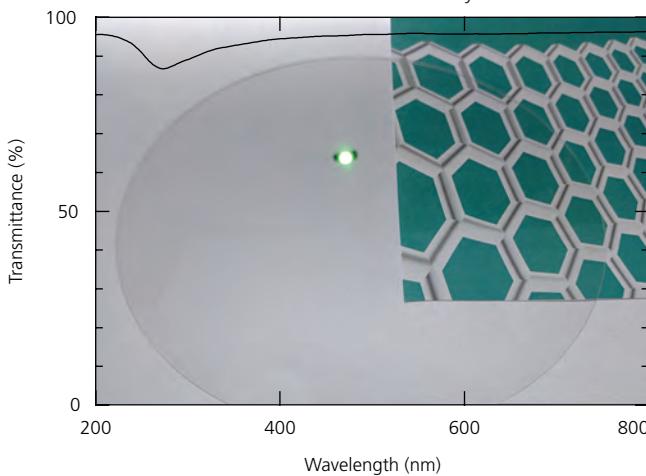
Am Fraunhofer IAF wird Graphen für die Anwendung als nahezu masselose Elektrode in elektroakustischen Resonatoren und als transparente, leitfähige Schicht untersucht. Für diese Verwendung ist das Prozessieren auf Waferskala eine zwingende Voraussetzung. Im Rahmen des europäischen »Graphene Flagship« entwickeln wir am Fraunhofer IAF eine Technologie zur Graphenbeschichtung auf Waferskala.

Chemische Gasphasenabscheidung von Graphen auf Metal-Dünnfilmen
 Um eine Graphenbeschichtung auf Wafer-skala zu erreichen, nutzen wir die chemische



2 CVD reactor for graphene.
CVD-Reaktor für Graphen.

to be used. Depending on the substrate, this also leads to the formation of a preferential crystal orientation in the copper catalyst



3 In the foreground, the transmittance spectrum of a graphene coating on quartz with a sheet resistance of $303 \pm 15 \Omega/\square$ is depicted. In the background, a 100 mm quartz wafer can be seen with a commercial LED chip attached. This chip is powered via the graphene coating.

Im Vordergrund ist das Transmissionsspektrum einer Graphenbeschichtung auf Quarz mit $303 \pm 15 \Omega/\square$ dargestellt. Im Hintergrund ist ein Quarzwafer mit 100 mm Durchmesser zu sehen, beim dem die Stromversorgung einer kommerziellen LED über die Graphenschicht erfolgt.

layer. By means of the wet-chemical underetching of the metal catalyst, the graphene layer is released and transferred to the target substrate without the need for macroscopic delamination from the growth substrate. The scalability of the process is thus

dramatically improved compared with the conventional floating transfer, enabling wafer-scale graphene coatings to be produced.

Interfacial Energy Control for Wafer-scale Graphene Transfer

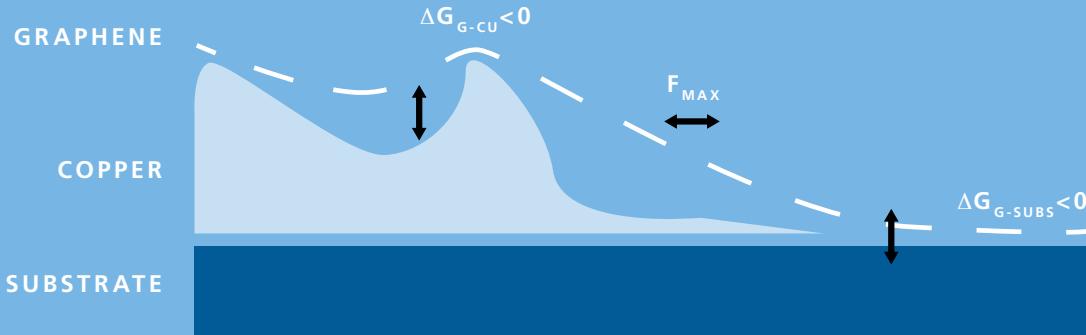
During the wet-chemical removal of the metal catalyst after the graphene CVD process, the key challenge is to preserve the single-atom thick layer of graphene, avoiding delamination or tearing. Regulating the respective surface energies at the material interfaces between the graphene, solvent, metal, and target substrate was found to play a crucial role here. By performing plasma pretreatments of the target surface and selecting the appropriate solvent for the various process steps of etching and drying, closed graphene layers could be realized on silicon/silicon dioxide, fused silica, and aluminum nitride with wafer diameters of up to 100 mm.

Graphene as a Transparent Conducting Layer

Since they are so thin, graphene electrodes exhibit a high transmission of electromagnetic waves in a broad range of wavelengths. In particular, the transparency is not correlated to a bandgap. This leads to a high transmittance even in the ultraviolet spectrum, a fact that makes graphene highly attractive as a possible transparent conducting layer for UV light-emitting diodes or photodetectors. A graphene coating with an average thickness of two atomic layers on quartz glass reached a sheet resistance of $303 \pm 15 \Omega/\square$ at a graphene layer transmittance of over 95 % at 200 nm. By way of comparison, indium tin oxide layers with a comparable sheet resistance have a transmittance of below 70 %.

From Graphene towards 2D Material Heterostructures

This technological approach towards producing wafer-scale graphene not only provides good prospects for graphene to replace traditional materials, but also for the future of 2D material heterostructure manufacturing. The process can be repeated to create van der Waals bonded multilayers and can be combined with interlayer dopants. The new challenge of 2D material growth and van der Waals stacking will require scientific advances in the understanding of 2D material interfaces. The control of interfacial energies is an important step towards gaining such an understanding and can be extended to enable the self-assembly of different van der Waals heterostructures.



4

During wet-chemical copper underetching, adhesion energies at the interfaces of graphene with copper ΔG_{G-Cu} and substrate ΔG_{G-Subs} can be adapted to prevent delamination. At the same time, to avoid tearing the maximum stress F_{max} on the thin graphene layer must not be exceeded.

Die Adhäsionsenergie zwischen Graphen und Kupfer ΔG_{G-Cu} und Graphen und Substrat ΔG_{G-Subs} während des nass-chemischen Ätzens von Kupfer kann so angepasst werden, dass Adhäsion gewährleistet ist, aber zu keinem Zeitpunkt die maximale Zugfestigkeit F_{max} überschritten wird.

95 %

Transmittance of 200 nm ultraviolet light through a graphene coating.

Transmission von ultraviolettem Licht bei 200 nm Wellenlänge durch die Graphenschicht.

Gasphasenabscheidung von Graphen auf metallischen Katalysator-Dünnfilmen, die bereits direkt auf dem jeweiligen Zielsubstrat stattfindet. Durch nasschemisches Unterätzen des Kupferkatalysators wird die Graphenschicht auf das darunterliegende Zielsubstrat transferiert, ohne eine makroskopische Delamination zu erfordern. Im Gegensatz zum konventionellen Verfahren verbessert dies die Skalierbarkeit drastisch, was großflächige Graphenbeschichtung möglich macht.

Kontrolle der Grenzflächenenergien im Transferprozess

Die größte Herausforderung beim nass-chemischen Entfernen des Metallkatalysators nach dem Graphen-CVD-Prozess ist es, eine Delamination oder ein Reißen der atomar dünnen Graphenschicht zu verhindern. Hierbei zeigte sich, dass eine Regulierung der jeweiligen Oberflächenenergien zwischen Graphen, Lösungsmittel, Metall und Zielsubstrat eine entscheidende Rolle spielt. Durch plasmagestützte Vorbehandlungen der Oberfläche des Zielsubstrates und durch Selektion des geeigneten Lösungsmittels während des Ätzens und Trocknens konnten geschlossene Graphenschichten auf Silizium/Siliziumdioxid, Quarz und Aluminiumnitrid mit Waferdurchmessern bis zu 100 mm erreicht werden.

Graphen als transparente, leitfähige Schicht

Eine Graphenschicht zeigt eine hohe Transmission elektromagnetischer Strahlung in einem sehr breiten Wellenlängenbereich.

Diese röhrt von der extrem niedrigen Schichtdicke her und ist nicht beeinflusst von einer Bandlücke. Dadurch ist die hohe Transmission selbst im ultravioletten Bereich gegeben; eine Tatsache die Graphen hochinteressant zur Verwendung in Leuchtdioden oder Detektoren für den UV-Bereich macht. Eine Graphenbeschichtung mit einer durchschnittlichen Dicke von zwei Atomlagen erreichte so einen Schichtwiderstand von $303 \pm 15 \Omega/\square$ bei einer Transmission durch die Graphenschicht von 95 % bei 200 nm Wellenlänge. Schichten aus Indiumzinnoxid mit vergleichbarem Schichtwiderstand zeigen im Vergleich dazu eine Transmission unterhalb von 70 %.

Von Graphen zu 2D-Material-Heterostrukturen

Dieser technologische Ansatz zur Graphenbeschichtung auf Waferskala ist nicht nur vielversprechend als Ersatz für herkömmliche Materialien, sondern auch für die Zukunft in der Produktion von 2D-Material-Heterostrukturen. Der beschriebene Prozess kann wiederholt werden, um Van-der-Waals gebundene Multilagen herzustellen. Hierbei könnte das Verständnis und die Kontrolle der jeweiligen Grenzflächenenergien eine entscheidende Rolle spielen.

X-ray Diffraction Analysis of Wide-bandgap Semiconductors

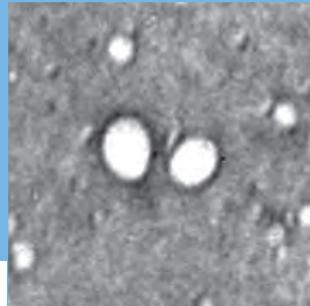
Lutz Kirste – lutz.kirste@iaf.fraunhofer.de

Wide-bandgap semiconductor substrates like GaN and diamond with low defect density are a prerequisite for the production of high-power electronic devices with outstanding properties. This is why Fraunhofer IAF has used X-ray diffraction to perform a detailed analysis of GaN and diamond substrate quality in terms of bulk and surface structural perfection. We combined X-ray topography, high resolution X-ray diffraction, and X-ray reflectivity to make a holistic assessment of the substrate quality. It has been found that depending on the growth technique and substrate supplier, the defect density and defect types vary considerably for GaN and diamond substrates.

Due to their wide bandgap and resistivity, high breakdown voltage, high bulk carrier mobility, and high thermal conductivity, GaN and diamond are promising materials for high-power electronic devices.

Fraunhofer IAF will firstly use GaN and diamond to develop vertical Schottky barrier diodes. Such demanding devices need material with outstanding structural perfection, since defects such as dislocations and stacking faults limit the efficiency, performance, and lifetime of these devices. Vertical Schottky barrier diodes with differently doped p-type layers are, in the case of GaN, fabricated by metal-organic chemical vapor epitaxy (MOVPE) on freestanding GaN substrates. For diamond-based Schottky barrier diodes, the p-type doped layers are

deposited by chemical vapor deposition (CVD) on freestanding diamond substrates. For both material systems, the defect density of the homoepitaxial layers depends not only on the growth parameters, but on the predetermined density of dislocations in the substrate material. The quality of the surface preparation of the substrates in terms of subsurface damage also has an impact on the structural perfection of the homoepitaxial GaN or diamond layers. Here we are interested in examining significant differences in the defect structure of GaN and diamond substrates, which can be observed in samples obtained from different manufacturers and as a function of the growth technique. X-ray diffraction-based measurement techniques such as X-ray topography (XRT), high resolution X-ray



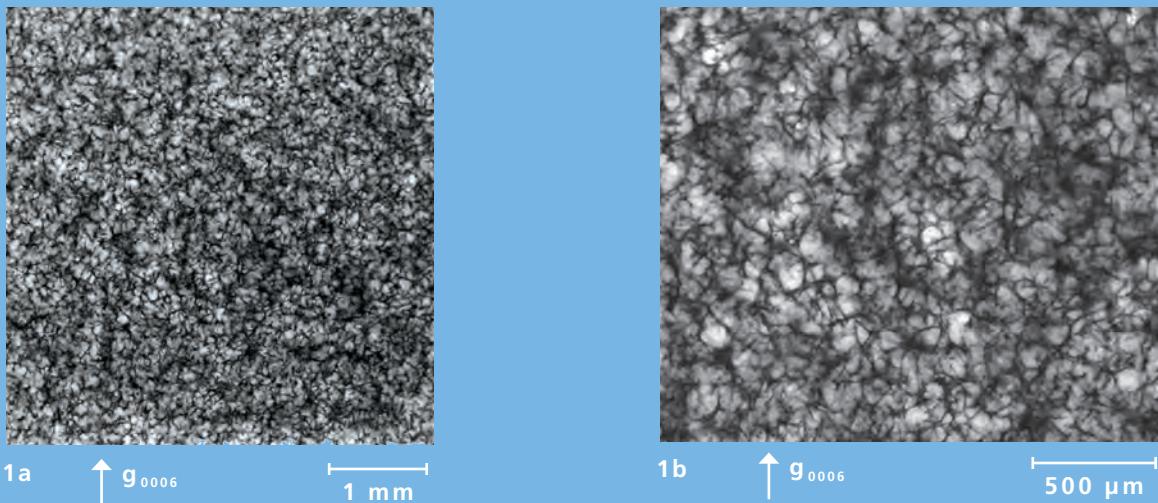
- Wide-bandgap semiconductors
- Structural defects
- X-ray topography
- Subsurface analysis
- Diffuse scattering

Röntgenbeugungsanalyse an Halbleitern mit großer Bandlücke

Substrate von Halbleitern mit großer Bandlücke wie Galliumnitrid (GaN) und Diamant mit geringer Defektdichte sind Voraussetzung für die Realisierung von Hochleistungselektronik-Bauelementen mit herausragenden Eigenschaften. Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer IAF eine detaillierte Analyse von GaN- und Diamantsubstratqualität hinsichtlich der Volumen- und Oberflächenstrukturperfektion durch Röntgenbeugungsanalyse durchgeführt. Es wurden Röntgentopographie, hochauflösende Röntgenbeugung und Röntgenreflektometrie kombiniert, um eine ganzheitliche Betrachtung der Substratqualität zu erhalten. Es wird gezeigt, dass die Defektdichte und die Defekttypen je nach Wachstumsmethode und Substratlieferanten bei GaN- und Diamantsubstraten beträchtlich variieren.

GaN und Diamant sind aufgrund ihrer großen Bandlücke und hohen Widerstands-, ihrer hohen Durchbruchsspannung, hohen Volumenladungsträgerbeweglichkeit sowie hohen Wärmeleitfähigkeit vielversprechende Materialien für Bauelemente der Hochleistungselektronik. Das Fraunhofer IAF wird GaN und Diamant als ersten Schritt für vertikale Schottky-Barrierendiode einsetzen. Für solche anspruchsvollen Bauelemente wird ein Material mit hervorragender struktureller Perfektion benötigt, da Defekte wie Versetzungen und Stapelfehler den Wirkungsgrad, die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer der Bauelemente begrenzen. Vertikale Schottky-Barrierendiode mit unterschiedlich dotierten p-leitenden Schichten werden

bei GaN, durch metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE) auf freistehenden GaN-Substraten hergestellt. Für diamantbasierte Schottky-Barrierediode werden die p-dotierten Schichten mittels chemischer Gasphasendeposition (CVD) auf freistehenden Diamantsubstraten abgeschieden. Für beide Materialsysteme hängt die Defektdichte der homoepitaktischen Schichten außer von den Wachstumsparametern von der vorgegebenen Dichte der Versetzungen im Substratmaterial ab. Weitere Auswirkungen auf die strukturelle Perfektion der homoepitaktischen GaN- oder Diamantschichten beruhen auf der Qualität der Oberflächenpräparation der Substrate hinsichtlich der Oberflächenschädigung. Dazu untersuchen wir die



1 Large-area SWXRT of HVPE GaN showing a cellular dislocation network.

Fig. 1a: 0006 reflection and

Fig. 1b: enlargement of 0006 reflection.

SWXRT von HVPE-GaN mit einem zellulären Versetzungsnetzwerk.

Abb. 1a: 0006-Reflex und Abb. 1b: Vergrößerung des Reflex 0006.

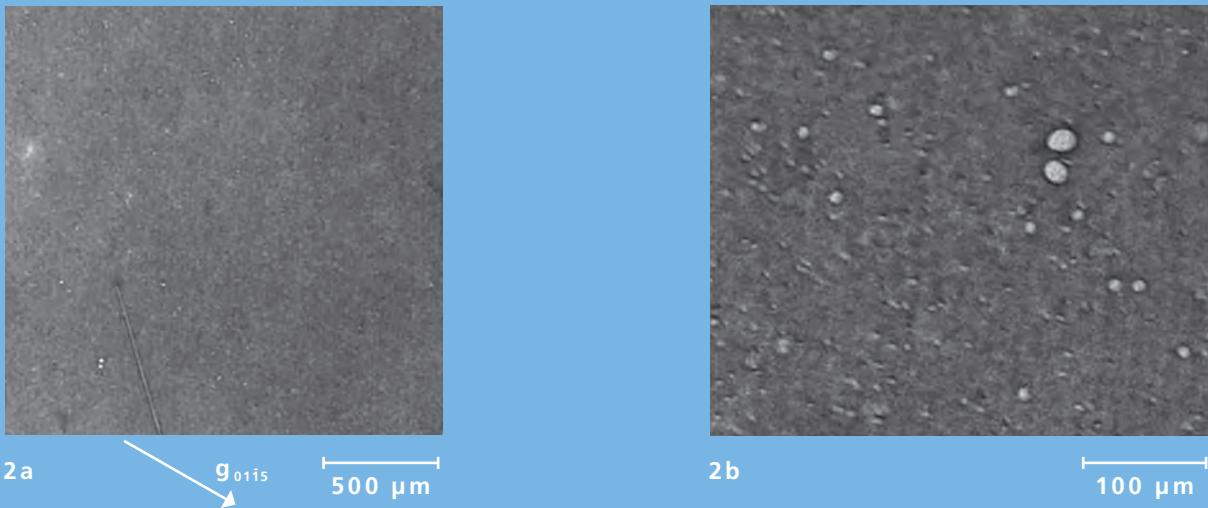
diffraction (HRXRD), and X-ray reflectivity (XRR) are used to evaluate GaN and diamond substrate quality and growth optimization.

Defect Density Analysis of the GaN Substrates

GaN-based Schottky barrier diode structures are grown on commercial GaN (0001) substrates produced by means of hydride vapor-phase epitaxy (HVPE) or the ammonothermal growth method. The defect structure of the GaN substrates was analyzed using synchrotron white-beam X-ray topography (SWXRT) at the ANKA synchrotron light source facility at the Karlsruher Institute of Technology (KIT). Fig. 1 (a and b) shows the 0006 large-area back-reflection topographies of a HVPE-GaN substrate. The images reveal a blurred light-dark contrast with a mosaic-like grain structure. This contrast on the topographies can be interpreted as an orientation contrast of a heavily deformed crystal with tilted and twisted GaN grains. Due to the lattice misorientation, the diffracted beams can overlap or diverge, indicating a mosaic structure comprising independently diffracting cells. It is conspicuous that the individual grains on the topographies of this HVPE GaN are separated by a dark contrast of relatively sharp line structures. One explanation for these sharp lines of contrast is that they represent the strain fields of a cellular dislocation network. The sharp line features are convoluted contrasts caused by bundles of more or less parallel but snakelike tangled dislocations. The dislocations tend to be concentrated in and around the cellular walls with central

regions having an inclination towards less dislocation density. As a rough estimate, the average cell diameter is about 100 μm .

For bulk GaN synthesized using the ammonothermal method, a uniform gray contrast is visible on the SWXRT large-area back-reflection 0115-reflection topography (Fig. 2a). This indicates a high degree of structural quality. On closer examination, predominantly white contrasts are visible (Fig. 2b). These contrasts are related to threading screw-type dislocations (TSD) and threading mixed-type dislocations (TMD). This was determined from a dislocation analysis using invisibility criteria from 0006- (not shown here) and 0115-reflection topographies. No pure edge-type dislocations were identified that should have become visible in the asymmetric 0115-reflection topography and invisible in the symmetric 0006-reflection topography. Moreover, the TSDs are observed in a few discrete sizes. The symmetric white rings with the smallest diameter are caused by a single TSD, while features with a larger diameter are caused by overlapping strain fields of adjacent TSDs. Only discrete white circle sizes are possible, since the strain fields are directly proportional to integer multiples of the screw dislocation Burgers vector magnitude $b = n \cdot c$, where n is an integer, and c is the out-of-plane lattice parameter. Similar features are well known from SWXRT images of super-screw and hollow-core screw dislocations (micropipes) in SiC. The density of the TSDs is determined to $\sim 1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Despite the defects found, the topographies of this



2 01̄5-reflection large-area SWXRT of ammonothermal GaN. The uniform gray contrast indicates a low defect density (Fig. 2a). The contrasts in the enlargement (Fig. 2b) are individual screw dislocations.
01̄5-Reflex großer Flächen SWXRT aus ammonothermischem GaN. Der gleichmäßige graue Kontrast zeigt eine geringe Defektdichte (Abb. 2a). Die Kontraste in der Vergrößerung (Abb. 2b) sind einzelne Schraubenversetzungen.

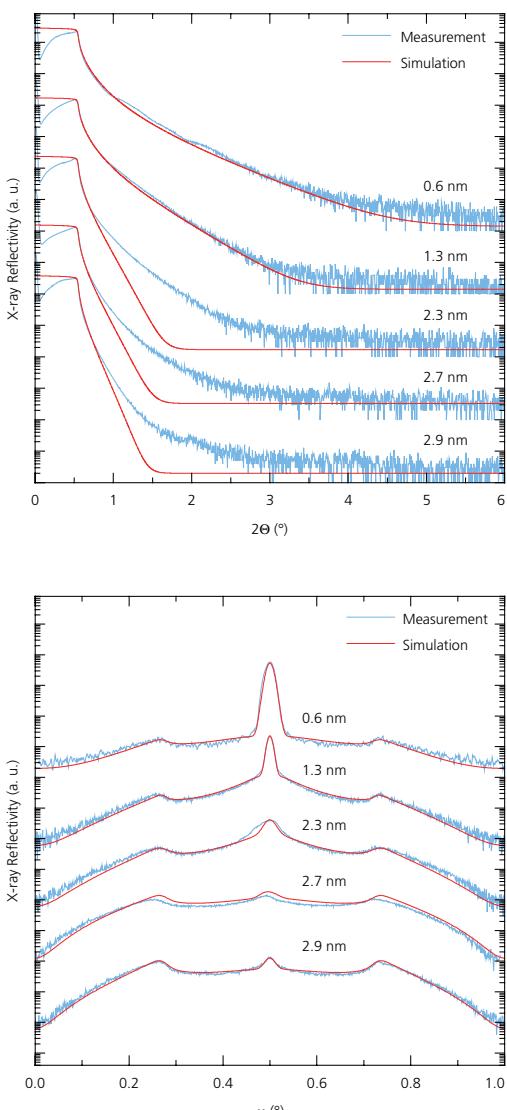
signifikanten Unterschiede in der Defektstruktur von GaN- und Diamantsubstraten, die in Proben von verschiedenen Herstellern und in Abhängigkeit von der Wachstumstechnik beobachtet werden können. Zur Bewertung der GaN- und Diamantsubstratqualität und Wachstumsoptimierung werden Röntgenbeugungsmesstechniken wie Röntgentopographie (XRT), hochauflösende Röntgenbeugung (HRXRD) und Röntgenreflektometrie (XRR) verwendet.

Defektdictheanalyse der GaN-Substrate

Das Wachstum von GaN-basierten Schottky-Barrieref-Diodenstrukturen wird auf kommerziellen GaN (0001)-Substraten realisiert, die durch Hydrid-Gasphasenepitaxie (HVPE) oder durch das Verfahren des ammonothermalen Wachstums hergestellt werden. Zur Untersuchung der Defektstruktur der GaN-Substrate wurde Synchrotron-Weißlicht-Röntgen-Topographie (SWXRT) an der ANKA-Synchrotronquelle am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verwendet. Abb. 1 (a und b) zeigen die 0006 »large-area«-Rückstrahltopografien eines HVPE-GaN-Substrats. Die Aufnahmen zeigen einen verschwommenen hell-dunklen Kontrast mit einer mosaikartigen Kornstruktur. Dieser Kontrast auf den Topographien kann als Orientierungskontrast eines stark deformierten Kristalls mit verkippten und verdrehten GaN-Körnern interpretiert werden. Aufgrund der Gitterfehlorientierung können sich die gebeugten Strahlen überlappen oder divergieren, was eine Mosaikstruktur von unabhängig voneinander beugenden Zellen

anzeigt. Auffällig ist, dass auf den Topographien dieses HVPE-GaN die einzelnen Körner durch einen dunklen Kontrast von relativ scharfen Linienstrukturen getrennt sind. Eine Erklärung für diese scharfen Linienkontraste ist, dass wir die Spannungsfelder eines zellulären Versetzungsnetzes beobachten. Die scharfen Linienstrukturen sind gewundene Kontraste, die durch Bündel von mehr oder weniger parallelen, aber schlangenartig verwickelten Versetzungen verursacht werden. Die Versetzungen tendieren dazu, sich in und um die Zellwände zu konzentrieren, wobei zentrale Bereiche eine geringere Versetzungsichte aufweisen. Als grobe Abschätzung beträgt der durchschnittliche Zelldurchmesser etwa 100 μm.

Für nach dem ammonothermalen Verfahren hergestelltes Volumen-GaN ist auf den ersten Blick ein gleichmäßiger grauer Kontrast auf der SWXRT 01̄5-Rückstrahltopografie (Abb. 2a) sichtbar, was auf eine hohe strukturelle Qualität hinweist. Bei näherer Betrachtung sind überwiegend weiße Kontraste zu erkennen (Abb. 2b). Bei diesen Kontrasten handelt es sich um Fadenschraubenversetzungen (TSD) und Fadenmischversetzungen (TMD). Dies wurde aus einer Versetzungsanalyse unter Verwendung von Auslöschungskriterien anhand von 0006- (hier nicht gezeigt) und 01̄5-Rückstrahltopographien bestimmt. Es wurden keine reinen Stufenversetzungen identifiziert, die in der asymmetrischen 01̄5-Rückstrahltopografie sichtbar und in der symmetrischen 0006-Rückstrahltopografie unsichtbar wären. Zudem werden die



5 X-ray reflectivity analysis of the substrates' roughness: a) specular scans, b) diffuse scattering scans.
Röntgenreflektivitätsanalyse der Rauheit der Substrate. a) Spekuläre Scans, b) Scans der diffusen Streuung.

ammonothermal GaN wafer provide no signs of a pronounced mosaic structure as was observed for HVPE GaN.

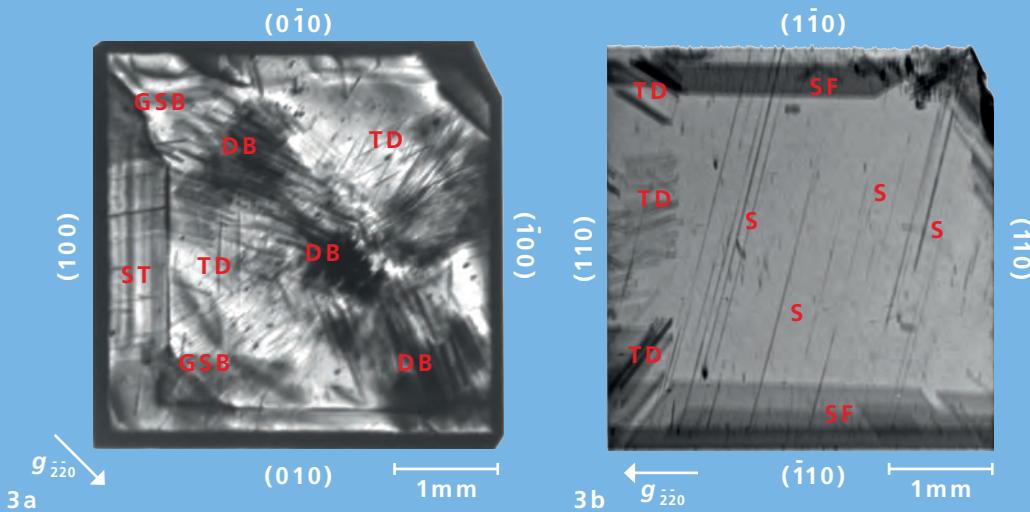
Defect Density Analysis of the Diamond Substrates

We use commercial substrate material grown using the high-pressure high-temperature method (HPHT) with (001) crystal orientation to grow diamond-based Schottky barrier diode structures by means of CVD. Here we applied the XRT Lang laboratory technique in two principal ways to analyze the quality of the substrates, namely the projection transmission mode and section transmission mode. The structural analysis of the commercial substrates reveals that there are large differences depending on the vendor or substrate type (e.g. doping level). As an example, Fig. 3a and 3b show XRT 220-reflection projection transmission topographies of (001) diamond substrates from two different vendors (diamond a) and diamond b)). The topography of diamond a) shows an inhomogeneous distribution of defects (Fig. 3a). Dislocation bundles and single dislocations can be observed. The density of dislocations for this diamond substrate is $4.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Additional features such as growth sector boundaries and striations (strip-shaped patterns due to inhomogeneous incorporation

of dopants or impurities) are visible. A much more homogeneous defect distribution is observed for diamond b) (Fig. 3b). The density of threading dislocation is quite low with a density of $2.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$. At the edge, areas with stacking faults become visible on the image of this diamond crystal. Line features that extend across the virtually entirely crystal area are identified as scratches. The distinctly different crystal quality of the substrates from the two different vendors is confirmed by the images in the section transmission geometry (Fig. 4a – Fig. 4d). While the section transmission topography of diamond a) shows a distorted pattern due to the high density of defects (Fig. 4a), the topography of diamond b) reveals so-called Kato fringes (Fig. 4b). The visibility of Kato fringes is a characteristic of dynamical diffraction, indicating high crystalline perfection. An enlarged view of well-resolved Kato fringes can be seen in Fig. 4c, while Fig. 4d shows the enlarged pattern of a single dislocation.

Analysis of the Surface Roughness and the Subsurface Damage

In order to grow homoepitaxial CVD diamond layers with few defects, both a low defect density of the HPHT substrate in the bulk and the quality of the surface are decisive. The surface has to be smooth and free from subsurface damage. Subsurface damage (polishing damage) in a substrate causes defects to form during CVD diamond growth and must therefore be eliminated before growth. Etching processes are typically used to eliminate subsurface damage. XRR and HRXRD



3 220-type reflection X-ray topography of diamond substrates from two different vendors. Diamond a) has a high defect density with threading dislocations (TD), dislocation bundles (DB), growth sector boundaries (GSB), and striations (ST). A much lower defect density is detected for diamond b). Besides a few threading dislocations (TD), stacking faults (SF), and scratches (S) on the surface are visible.

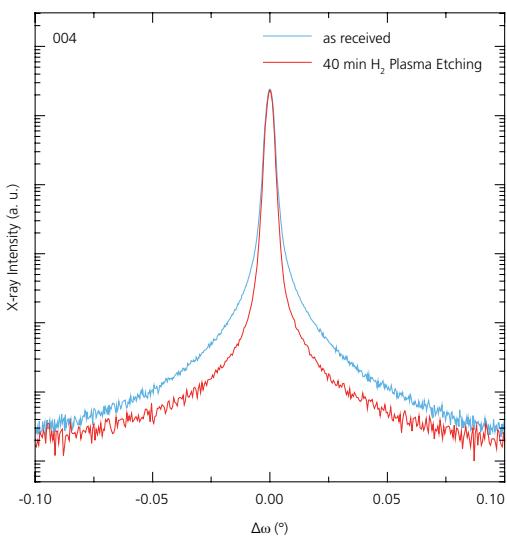
220-Reflex Röntgen-Topographie von Diamantsubstraten zwei verschiedener Anbieter. Der Diamant a) hat eine hohe Defektdichte mit Fadenversetzungen (TD), Versetzungsbündeln (DB), Wachstumssektorgrenzen (GSB) und Striations (ST). Für Diamant b) wird eine viel niedrigere Defektdichte detektiert. Neben wenigen Fadenversetzungen (TD) sind Stapelfehler (SF) und Kratzer (S) auf der Oberfläche sichtbar.

TSDs in wenigen diskreten Größen beobachtet. Die symmetrischen weißen Ringe mit dem kleinsten Durchmesser werden durch eine einzige TSD verursacht, und Kontraste mit einem größeren Durchmesser werden durch überlappende Spannungsfelder benachbarter TSDs verursacht. Nur diskrete weiße Kreisgrößen sind möglich, da die Spannungsfelder direkt proportional zu ganzzahligen Vielfachen der Schraubenversetzung Burgers-Vektorgröße $b = n \cdot c$ sind, wobei n eine ganze Zahl ist und c der außerhalb der senkrecht zur Basalebene liegende Gitterparameter. Ähnliche Beobachtungen sind von SWXRT-Bildern von Superschrauben- und Hohlkernschraubenversetzungen (Mikroröhren) in SiC gut bekannt. Die Dichte der TSDs wurde auf $\sim 1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ bestimmt. Trotz der gefundenen Defekte zeigen die Topographien dieses ammonothermalen GaN-Wafers keine Anzeichen einer ausgeprägten Mosaikstruktur, wie sie für HVPE-GaN beobachtet wurde.

Defektdichteanalyse der Diamant-Substrate

Für das CVD-Wachstum der diamantbasierten Schottky-Barrieref-Diodenstrukturen verwenden wir kommerzielles Substratmaterial, das durch Hochdruck-Hochtemperaturverfahren (HPHT) mit Kristallorientierung (001) gezüchtet wird. Hier haben wir laborbasierte Lang-Technik XRT in zwei Grundarten angewendet, um die Qualität der Substrate zu analysieren, nämlich der Projektions- und der Sektionstechnik. Die strukturelle Analyse der kommerziellen Substrate zeigt, dass es große Unterschiede in Abhängigkeit vom Hersteller

oder Substrattyp gibt (z. B. Dotierungs niveau). Die Abb. 3a und 3b zeigen als Beispiel 220-Reflex-Projektionstopographien von (001) Diamantsubstraten von zwei verschiedenen Herstellern (Diamant a) und Diamant b)). Die Topographie von Diamant a) zeigt eine inhomogene Verteilung von Defekten (3a). Versetzungsbündel und einzelne Versetzungen können beobachtet werden. Die Dichte der Versetzungen für dieses Diamantsubstrat beträgt $4,0 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Zusätzliche Merkmale wie Wachstumssektorgrenzen und Striations (streifenförmige Muster aufgrund eines inhomogenen Einbaus von Dotierstoffen oder Verunreinigungen) sind sichtbar. Für Diamant b) wird eine viel homogener Defektverteilung beobachtet (Abb. 3b). Die Dichte der Fadenversetzungen ist mit $2,6 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ recht niedrig. Am Rand werden auf der Aufnahme dieses Diamantkristalls Bereiche mit Stapelfehlern sichtbar. Bei den Linienkontrasten, die sich über den nahezu gesamten Kristallbereich erstrecken, handelt es sich um Kratzer. Die deutlich unterschiedliche Kristallqualität der Substrate der beiden Hersteller wird durch die Aufnahmen in der Sektionsgeometrie bestätigt (Abb. 4a/4d). Während die Transmissions-Sektionstopographie von Diamant a) aufgrund der hohen Dichte von Defekten ein verzerrtes Muster zeigt (Abb. 4a), zeigt die Topographie von Diamant b) sogenannte Kato-Fringes (Abb. 4b). Die Sichtbarkeit von Kato-Fringes ist ein Merkmal der dynamischen Beugung, was auf eine hohe kristalline Perfektion hinweist. Eine vergrößerte Ansicht von gut aufgelösten Kato-Fringes ist auf Abb. 4c sichtbar.



6 HRXRD ω -scan analysis of the diffuse scattering of a diamond substrate as received and an etched diamond substrate.

Reduced diffuse scattering is observed for the etched sample due to the removal of subsurface damage.

*HRXRD ω -Scan-Analyse der diffusen Streuung eines wie-erhaltenen und eines geätzten Diamantsubstrats.
 Eine reduzierte diffuse Streuung wird für die geätzte Probe aufgrund der Entfernung von Oberflächenschäden beobachtet.*

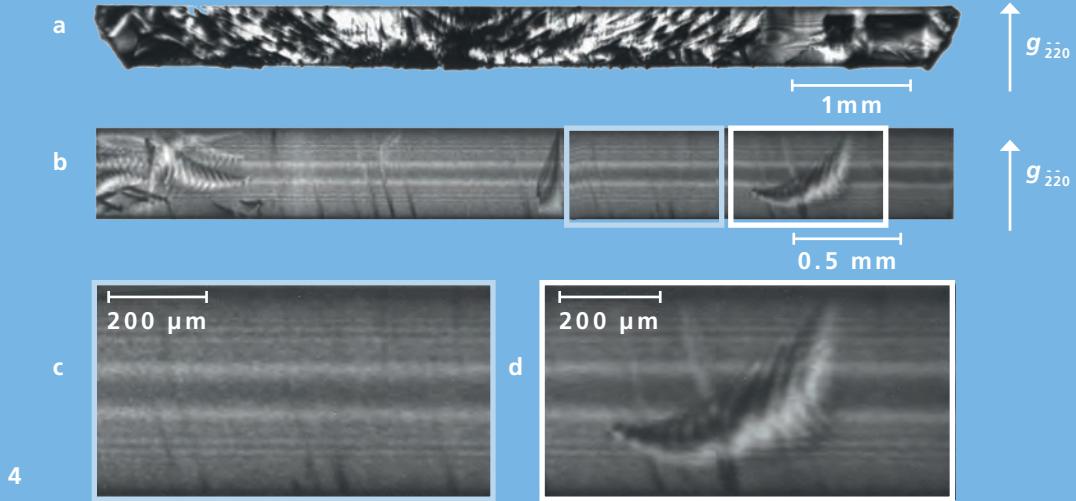
omega scans are used to analyze the smoothness of the substrates and the subsurface damage respectively. Fig. 5 shows XRR scans of HPHT (001) diamond substrates from five different vendors. In the »specular XRR scans«, the drop in intensity is a measure of the roughness of the surface (Fig. 5a), while in the »diffuse scattering XRR« scans, the roughness is indicated by the height of the specular peak and the so-called Yoneda wings (Fig. 5b). The combination of the two XRR scan directions makes the analysis highly accurate. Roughness values

from 0.6 to 2.9 nm were determined for the investigated set of samples, showing a large variation depending on the substrate vendor.

An example analysis of the removal of subsurface damage is shown by HRXRD omega scans in Fig. 6. The blue pattern displays the HRXRD 004-reflection omega scan of a diamond substrate as received from the vendor and the red pattern displays the

scan after H_2 plasma-etching treatment. An etched-away thickness of about 140 nm was determined. At 10.0 arcsecs and 11.0 arcsecs respectively, the commonly used full width at half maximum (FWHM) in HRXRD is nearly the same before and after etching and is therefore insignificant with respect to subsurface damage. However, differences in the steepness of the reflex flanks can be clearly observed, indicating reduced diffuse scattering due to the elimination of subsurface damage. We therefore used the full width at ten thousandth to quantify the diffuse scattering. Here, a clear difference of 257.2 arcsec for the untreated sample and 149.7 arcsec for the etched sample was determined.

The various X-ray diffraction analytical methods allow a detailed statement to be made on the nature, density, and distribution of typical defects in GaN and diamond bulk substrates with a large field of view. The analytical results provide valuable support during the development of high-power electronics at Fraunhofer IAF.



4 X-ray section topography (220-type reflection) of the investigated diamond substrates. Due to the high defect density a very distorted pattern can be seen for diamond a) (Fig. 4a). The visibility of Kato fringes confirms the crystalline perfection of sample diamond b) (Fig. 4b, 4c). D) displays the enlarged pattern of a single dislocation.
 Röntgen Sektions-Topographie (220-Typ-Reflex) der untersuchten Diamantsubstrate. Aufgrund der hohen Defektdichte ist für Diamant a) ein sehr verzerrtes Muster zu sehen (Abb. 4a). Die Sichtbarkeit von Kato-Fringes bestätigt die kristalline Perfection der Probe Diamant b) (Abb. 4b, 4c). Abb. 4d zeigt das vergrößerte Muster einer einzelnen Versetzung.

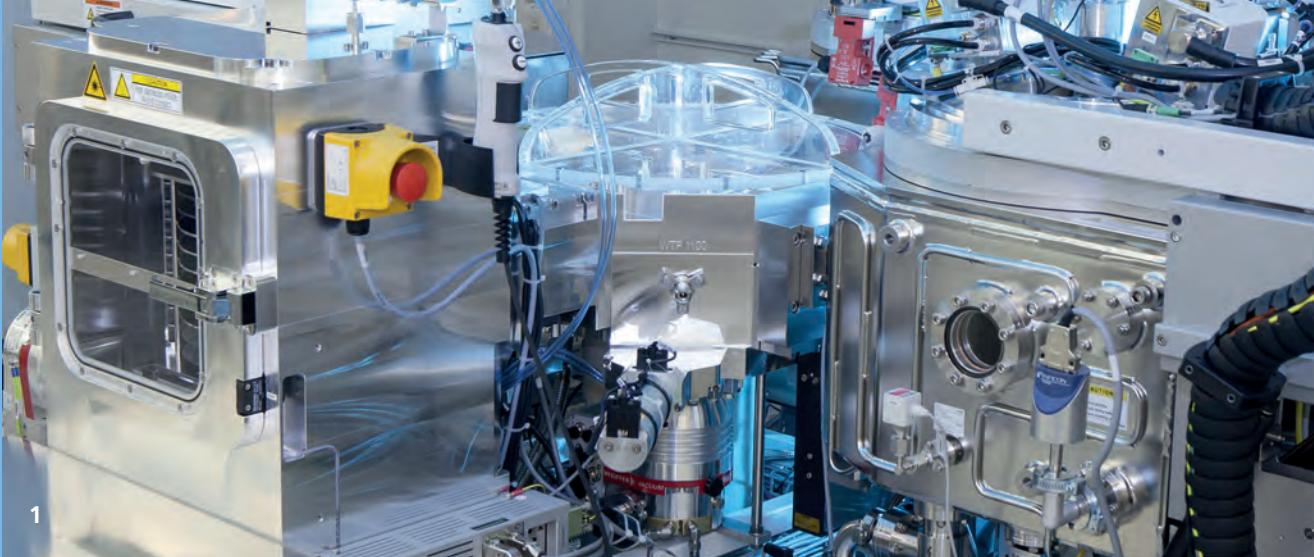
Abb. 4d zeigt das vergrößerte Muster einer einzelnen Versetzung.

Analyse der Oberflächenrauheit und der Oberflächenschädigung

Um defektfreie homoepitaktische CVD-Diamantschichten zu wachsen, ist nicht nur eine geringe Defektdichte des HPHT-Substrats im Volumen wichtig, sondern auch die Qualität der Oberfläche ist entscheidend. Die Oberfläche muss glatt und frei von Oberflächenschädigungen (Polierschäden) in einem Substrat verursachen die Bildung von Defekten beim CVD-Diamantwachstum und müssen daher vor dem Wachstum eliminiert werden. Ätzverfahren werden typischerweise verwendet, um die Oberflächenschädigung zu eliminieren. XRR- und HRXRD-Omega-Scans werden für Analysen der Glattheit der Substrate bzw. des Oberflächenschadens verwendet. Abb. 5 zeigt XRR-Scans von HPHT (001) Diamantsubstraten von fünf verschiedenen Herstellern. Bei den »spekulären XRR-Scans« ist der Abfall der Intensität ein Maß für die Rauheit der Oberfläche (Abb. 5a), während für die »diffuse XRR Streuung« die Höhe des spekulären Peaks und der sogenannten Yoneda Wings eine Indikation für die Rauheit ist (Abb. 5b). Die Kombination der beiden XRR Scan-Richtungen verleiht der Analyse eine hohe Genauigkeit. Für den untersuchten Satz von Proben werden Rauheitswerte von 0,6 bis 2,9 nm bestimmt, die eine große Variation in

Abhängigkeit vom Substratanbieter zeigen. Ein Beispiel für die Analyse der Entfernung von Oberflächenschäden wird durch HRXRD-Omega-Scans in Abb. 6 gezeigt. Die blaue Kurve zeigt den HRXRD-004-Reflex Omega-Scan eines Diamantsubstrats, wie wir es vom Anbieter erhalten haben, und die rote Kurve nach einer H₂-Plasmaätzbehandlung. Eine geätzte Dicke von ca. 140 nm wurde bestimmt. Die oft verwendete Halbwertsbreite (FWHM) bei HRXRD ist mit 10,0 arcsec vor und 11,0 arcsec nach dem Ätzen nahezu identisch und somit nicht signifikant hinsichtlich der Oberflächenschädigung. Jedoch können Unterschiede in der Steilheit der Reflexflanken deutlich beobachtet werden, was eine verminderte diffuse Streuung aufgrund der Eliminierung des Oberflächenschadens anzeigen. Daher nutzen wir die »full width at ten thousandth«, um die diffuse Streuung zu quantifizieren. Hier wurde eine deutliche Differenz von 257,2 arcsec für die unbehandelte Probe und 149,7 arcsec für die geätzte Probe bestimmt.

Die verschiedenen Röntgenbeugungsanalyseverfahren ermöglichen eine detaillierte Aussage über die Art, Dichte und Verteilung von typischen Defekten in GaN- und Diamant-Volumen-Substraten mit großem Sichtbereich. Die analytischen Ergebnisse liefern wertvolle Unterstützung für die Entwicklung von Hochleistungselektronik am Fraunhofer IAF.



AlScN – Development of Novel Piezoelectric Materials

Agne Zukauskaite – agne.zukauskaite@iaf.fraunhofer.de

We are in constant need of more and more ways of communicating and sharing large amounts of information. A modern smartphone contains 20 – 50 RF frequency components and it is foreseen that this number will increase to as high as 100 or more over the next few years so as to accommodate all existing and future frequency bands. In order to achieve higher frequencies and build more efficient and smaller devices, we are developing novel piezoelectric materials such as aluminum scandium nitride (AlScN).

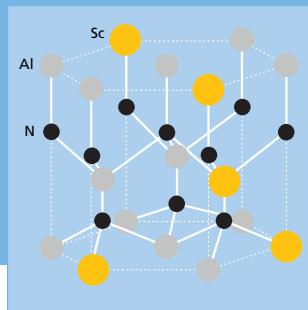
- 1 *A multi-chamber cluster tool dedicated to developing AlScN thin films.*
Clusteranlage zur AlScN-Materialentwicklung.

The piezoelectric effect allows oscillating electric voltage to be converted into mechanical vibrations or mechanical load into an electrical signal. This material property can be used for many different applications, such as electroacoustic filters, biosensors, or energy harvesting. Today, due to its good compatibility with Si technology, high thermal stability, and high acoustic velocities, piezoelectric aluminum nitride is one of the dominant materials used in RF frequency filters for mobile telecommunications. However, relatively low electro-mechanical coupling and piezoelectric coefficients are factors that limit the use of AlN, so enhanced piezoelectric properties of AlScN make it a promising alternative. We use reactive magnetron co-sputtering to investigate a wide range of Sc concentrations. This growth method is attractive for industrial applications due to scalability and moderate process temperatures compatible with device fabrication.

Highly Piezoelectric AlScN

Wurtzite-type crystals such as AlN have a permanent dipole due to vertical asymmetry in the unit cell. By alloying AlN with ScN, it is possible to create a metastable wurtzite-type aluminum scandium nitride (AlScN), in which Al and Sc are in continuous competition for different symmetry of bonding with nitrogen. This softens the bonds and makes the material more susceptible to deformation.

While this phenomenon has a positive effect on the piezoelectric properties of AlScN, it also makes the material prone to phase separation when the Sc concentration approaches 50 %. This is due to the different crystal structures of parent binary materials, namely wurtzite-type AlN and cubic ScN. If the growth parameters are properly optimized for the stabilization of the wurtzite phase, the piezoelectric coefficient d_{33} has the potential



- Novel metastable nitrides
- Enhanced piezoelectric properties
- Reactive magnetron sputtering
- Substrate pretreatment
- RF filters for mobile communications

AlScN – Entwicklung neuartiger piezoelektrischer Materialien

Unser Bedürfnis, auf unterschiedliche Arten zu kommunizieren und große Mengen von Informationen miteinander zu teilen, wächst stetig. Ein modernes Smartphone enthält 20 – 50 Hochfrequenz-Bauelemente. Es ist absehbar, dass mit der Einführung von neuen Mobilfunkbändern die Anzahl der Bauelemente auf bis zu 100 ansteigen wird. Um höhere Frequenzen zu erreichen und um effizientere und kleinere Bauelemente realisieren zu können, entwickeln wir neuartige piezoelektrische Materialien wie beispielsweise AlScN.

15.7
pC/N

Piezoelectric coefficient

d_{33} for $\text{Al}_{0.71}\text{Sc}_{0.29}\text{N/Si}$.

Piezoelektrischer Koeffizient

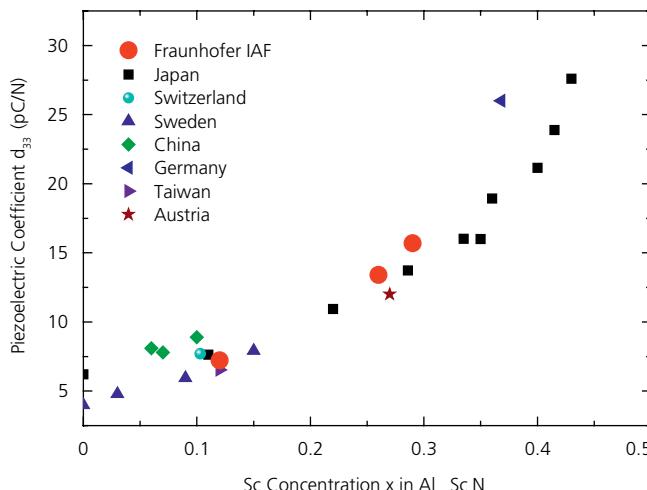
d_{33} für $\text{Al}_{0.71}\text{Sc}_{0.29}\text{N/Si}$.

Der piezoelektrische Effekt ermöglicht die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie. Diese Materialeigenschaft findet in vielen Bereichen Anwendung, z. B. in elektroakustischen Filtern, in Biosensoren oder »energy harvesting«. Aufgrund der guten Kompatibilität zur Si-Technologie, der hohen thermischen Belastbarkeit und einer großen akustischen Geschwindigkeit ist piezoelektrisches Aluminiumnitrid (AlN) eines der dominierenden Materialien für elektroakustische RF-Filter in der Mobilkommunikation. Für künftige Bauelemente, die bei höheren Frequenzen betrieben werden sollen, ist der Einsatz von AlN aufgrund der relativ geringen elektromechanischen Kopplung und des geringen piezoelektrischen Koeffizienten eingeschränkt. Aluminiumscandiumnitrid (AlScN) ist aufgrund der besseren piezoelektrischen Eigenschaften eine vielversprechende Alternative. Wir verwenden reaktives

Magnetron Co-Sputtern um einen großen Bereich unterschiedlicher Sc Konzentrationen zu untersuchen. Dank der moderaten Prozesstemperaturen und der Skalierbarkeit ist diese Methode sehr interessant für industrielle Anwendungen.

Stark piezoelektrisches AlScN

Wurtzit-Typ-Kristalle mit einer vertikalen Asymmetrie in der Einheitszelle (z. B. AlN) weisen ein permanentes Dipolmoment auf. Durch den Einbau von ScN in das AlN-Gitter entsteht der metastabile Wurtzit-Typ AlScN. Dabei führt die unterschiedliche Koordination von Al und Sc mit den Stickstoffatomen zu einer Schwächung der Gitterbindungen und das Material lässt sich leichter verformen. Während dieser Effekt eine positive Auswirkung auf die piezoelektrischen Eigenschaften von AlScN hat, wird das Material gleichzeitig anfälliger für Phasenseparationen bei einer



to increase to up to 27.6 pC/N for AlScN containing 43 % Sc. This would represent a more than 400 % increase compared with

AIN. In addition to the piezoelectric coefficient, the electromechanical coupling, which defines the efficiency of mechanic-to-electric energy conversion, increases from 6 % to 15 % or more due to alloying. This allows us to produce RF devices that consume a lot less power.

oxide layer and other surface contaminations are removed in a repeatable way prior to each deposition. Different gases can be used to control the nucleation behavior and polarity of nitride film deposited on substrates after such pre-treatment. Recently, up to 29 % Sc has been successfully incorporated into wurtzite AlScN layers with a d_{33} value of 15.7 pC/N. This is in line with previous theoretical predictions and experimental data.

Integration of AlScN into the Next-generation RF Devices

In order to produce next-generation RF filters for mobile communications in bands over 3 GHz, present-day surface acoustic wave (SAW) and thin film bulk acoustic wave resonators (TFBAR) also need to be replaced by more efficient membrane-based devices, such as Lamb wave resonators (LWR). The LWR enjoys advantages from both SAW and TFBAR: interdigital transducers (IDT) define the frequency, while the suspended membrane enables a higher quality factor Q. By integrating AlScN layers into such novel structures, we will simultaneously address the challenge of achieving higher frequencies on two fronts.

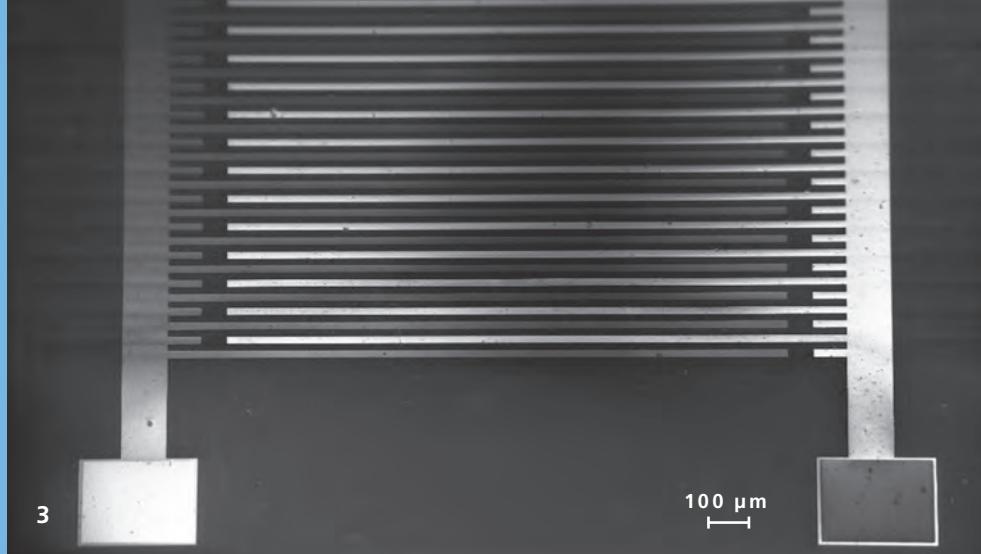
In conclusion, the synergy between material and device development is the key to providing more efficient RF devices. We see AlScN as a very strong candidate for enabling future high-data-rate mobile communications and other applications where the piezoelectric effect plays a role.

2 Piezoelectric coefficient d_{33} of AlScN thin films as a function of Sc concentration.

Piezoelektrischer Koeffizient d_{33} von AlScN als Funktion der Sc-Konzentration.

AlScN Material Development at Fraunhofer IAF

The performance of electroacoustic devices such as RF frequency filters strongly depends on the material quality. Smooth piezoelectric layers with high crystalline quality, thickness uniformity, and low residual stress require careful tuning of the growth parameters as well as substrate surface preparation before growth. Due to the aforementioned metastability, the synthesis of AlScN has to be even more carefully controlled to prevent phase separation and to ensure homogeneous composition on a wafer scale. The optimization of our growth process begins at the substrate surface. By using in-situ plasma-based etching techniques we can ensure that the silicon



3 *AlScN/Si SAW structure produced at Fraunhofer IAF.*
AlScN/Si-SAW-Struktur,
hergestellt am Fraunhofer IAF.

Sc-Konzentration ab ca. 50 %, da die zugrundeliegenden binären Materialverbindungen unterschiedliche Kristallstrukturen aufweisen: Wurtzit-Typ bei AlN und kubisch bei ScN. Bei optimierten Wachstumsparametern für die Stabilisierung der Wurtzitphase erreicht der piezoelektrische Koeffizient d_{33} bei einer Sc-Konzentration von 43 % Werte von bis zu 27,6 pC/N. Dies entspricht einer Zunahme von über 400 % im Vergleich zu AlN. Zusätzlich zum piezoelektrischen Koeffizient kann die elektromechanische Kopplung, das heißt die Effizienz der Wandlung von mechanischer zu elektrischer Energie, von 6 % auf 15 % und mehr gesteigert werden. Dies ermöglicht es uns, HF-Bauelemente mit deutlich geringerem Energieverbrauch herzustellen.

AlScN – Materialentwicklung am IAF

Die Leistung von HF-Filtern ist stark von der Materialqualität abhängig. Piezoelektrische Schichten mit hoher kristalliner Qualität, Dickenhomogenität und geringer Restspannung erfordern eine sorgfältige Anpassung der Wachstumsparameter sowie der Substratvorbereitung vor dem Wachstum. Aufgrund der oben erwähnten Metastabilität muss die Synthese von AlScN sogar noch genauer kontrolliert werden, um eine Phasentrennung zu verhindern und eine homogene Zusammensetzung auf Wafer-Skala zu gewährleisten. Die Optimierung unseres Wachstumsprozesses beginnt mit der Vorbehandlung der Substratoberfläche. Durch eine in-situ Plasma-basierte Ätztechnik stellen wir sicher, dass die natürliche Siliziumoxidschicht und andere Oberflächenverunreinigungen reproduzierbar

vor jedem Abscheideprozess entfernt werden. Durch die Verwendung unterschiedlicher Gase kann das Nukleationsverhalten und die Polarität der Nitridschicht kontrolliert werden. Kürzlich wurden bis zu 29 % Sc erfolgreich in Wurtzit-Typ AlScN-Schichten mit einem d_{33} -Wert von 15,7 pC/N eingebaut, der gut mit theoretischen Vorhersagen und experimentellen Daten übereinstimmt.

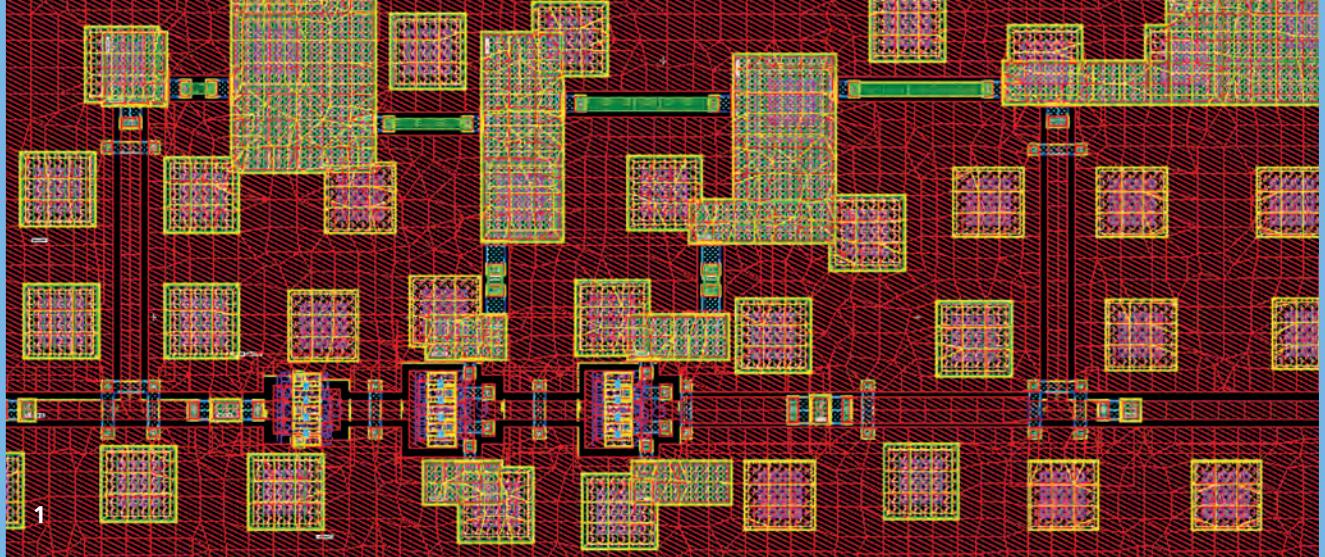
Integration von AlScN in HF-Bauelemente der nächsten Generation

Um HF-Filter für die Mobilkommunikation der nächsten Generation für Frequenzen oberhalb 3 GHz herstellen zu können, müssen die heute verwendeten Oberflächen (SAW)- und Dünnschicht-Volumenwellen-Resonatoren (TFBAR) durch neuere, effizientere Bauelemente ersetzt werden. Eine Möglichkeit sind membranbasierte Lamb-Wellenresonatoren (LWR). LWR vereinen die Vorteile von SAW und TFBAR: Interdigitalwandler (IDT) definieren die Frequenz, während die Membran einen höheren Gütefaktor ermöglicht. Durch die Integration von AlScN in die neuartigen Bauelemente bearbeiten wir die Herausforderungen für zukünftige HF-Bauelemente durch zwei wesentliche Weiterentwicklungen.

Folglich ist das Zusammenspiel von Material- und Bauelemententwicklung der Schlüssel für effizientere HF-Bauelemente. Wir betrachten AlScN als einen aussichtsreichen Kandidaten zur Realisierung von zukünftiger Mobilkommunikation mit hoher Datenrate sowie anderen Anwendungen, bei denen der piezoelektrische Effekt eine Rolle spielt.

> 3
GHz

*Frequencies achievable in AlScN-based RF filters.
Erreichbare Frequenzen in AlScN-basierten HF-Filtern.*



New Approaches in Circuit Design

Friedbert van Raay – friedbert.van.raay@iaf.fraunhofer.de

Our core competence of circuit design involves the realization of transmitter and receiver (TX, RX) front-ends using microwave monolithic integrated circuits (MMICs) in the microwave, millimeter-wave (mmW) and sub-mmW frequency ranges and is currently being extended for a variety of RF communication, radar, and sensing applications. The electromagnetic (EM) coupling between adjacent circuit substructures in mmW and sub-mmW MMICs requires the distributed modeling of active devices such as FETs, the sophisticated EM simulation of passive substructures, and even complete circuits like power amplifiers (PAs). As an example, this report describes the emerging circuit concept of a 280 GHz PA using »FET stacking«.

1 Layout of a »stacked-FET« power amplifier with more than 10,000 mesh cells.

Layout eines »Stacked-FET«-Leistungsverstärkers mit über 10.000 Gitternetz-Zellen.

The use of transmit and receive (TRX) front-ends as RF key components or subsystems increasingly requires compact, light-weight, cost-effective, and robust/reliable solutions using microwave monolithic integrated circuits (MMICs) and sub-MMICs for the microwave, millimeter-wave (mmW), and even sub-mmW frequency ranges. Increasing demands are also being placed on output power, dynamic range, bandwidth, and data rates.

Distributed Device Modeling and EM-Based Simulation

We are currently expanding our core competency of circuit design to include larger circuit complexities at even higher frequencies for use in these challenging fields of application.

This includes introducing emerging concepts like balanced circuits and device stacking topologies in the millimeter-wave (mmW) frequency range. These emerging research activities in circuit design require significant progress to be made in the model-based description of the passive and especially the active circuit elements. In particular, the distributed nature of the active devices, e. g. pseudomorphic InAlAs/InGaAs HEMTs (high electron mobility transistors) and AlGaN/GaN HEMTs that are produced in-house, at mmW frequencies on the one hand, and the low-frequency dispersion in these unipolar devices, which are related to traps and impact ionization phenomena, on the other hand, must be precisely covered in highly complex models of these active devices based



- Advanced circuit concepts
- Distributed device modeling
- EM simulation
- FET stacking

Neue Ansätze für den Schaltungsentwurf

Für diverse HF-Kommunikations-, Radar- und Sensoranwendungen erweitern wir zurzeit unsere Kernkompetenz »Schaltungsentwurf«, die zur Realisierung von Sender- und Empfänger- »Front-Ends« mit monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (MMICs) im Mikrowellen-, Millimeterwellen- (mmW) und Sub-mmW-Bereich erforderlich ist. Die bei kompakten mmW- und Sub-mmW-MMICs ausgeprägten elektromagnetischen (EM) Kopplungen zwischen einzelnen Strukturen erfordern eine verteilte Beschreibung der aktiven Bauelemente und eine leistungsfähige EM-Simulation von passiven Strukturen bis zu kompletten Schaltungen wie Leistungsverstärker (PAs). Exemplarisch wird ein Leistungsverstärker für 280 GHz mit »gestapelten« FETs als neuartiges Schaltungskonzept beschrieben (»FET Stacking«).

280 GHz

First mmW »stacked-FET«

PA beyond 100 GHz.

Der erste »Stacked-FET«-

Leistungsverstärker (PA)

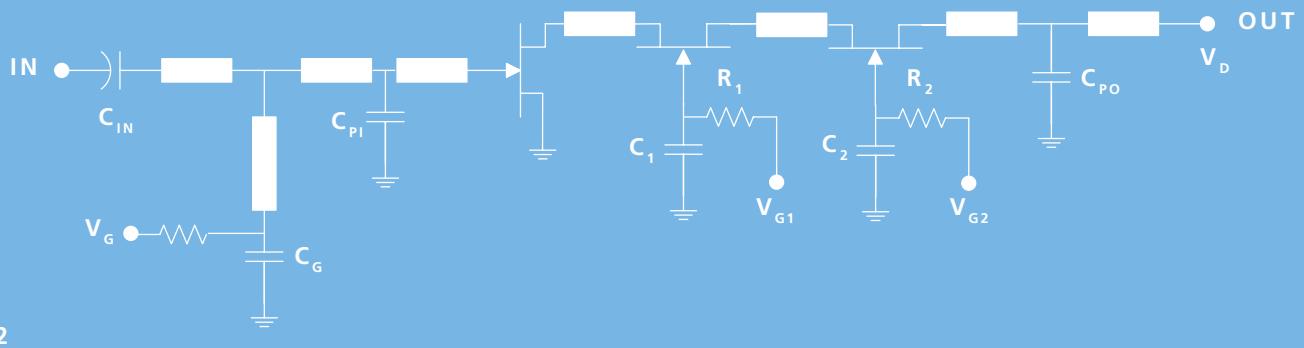
jenseits 100 GHz.

Für eine Vielzahl von Anwendungen, wie Mobil- und Satelliten-Kommunikation, KFZ- und Luftverkehrs-Radar, oder Fernerkundung werden mehr und mehr leichte, kompakte, kostengünstige und ebenso robuste wie zuverlässige Lösungen mit monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (MMICs) und Sub-MMICs für den Mikrowellen-, Millimeterwellen- (mmW) und Sub-mmW-Bereich bevorzugt, wobei die Anforderungen an Ausgangsleistung, Dynamikbereich und Bandbreite sowie Datenraten stetig zunehmen.

Verteilte Bauelement-Modellierung und EM-basierte Simulation

Für diese anspruchsvollen Anwendungsfelder erweitern wir derzeit unsere Kernkompetenz

»Schaltungsentwurf« in Richtung höherer Schaltungskomplexität und noch höherer Frequenzen, wobei herausragende Konzepte wie symmetrische Schaltungstechnik oder das »Stapeln« von FETs in die Millimeterwellentechnik eingeführt werden. Diese neuartigen Forschungsaktivitäten im Bereich des Schaltungsentwurfs werden notwendigerweise von signifikanten Fortschritten im Bereich der modellmäßigen Beschreibung der passiven und vor allem der aktiven Schaltungsbauelemente flankiert. Insbesondere müssen die im mmW-Bereich auftretenden verteilten Effekte sowie die durch tiefe Störstellen und Stoßionisation hervorgerufene Niederfrequenz-Dispersion der aktiven Bauelemente, z. B. der im Haus hergestellten pseudomorphen



2

2 Schematic diagram of the »stacked-FET« PA at 280 GHz.

Schaltung des »Stacked-FET«-Verstärkers bei 280 GHz.

on equivalent circuits (EC). In addition, the passive devices used in microwave, mmW, and sub-mmW monolithic integrated circuits (MMICs) require a more and more distributed description based on EM field simulation at increasing mmW frequencies. At higher microwave and mmW frequencies, the EM-coupling between adjacent passive and/or active substructures significantly increases and becomes more and more crucial for the performance of the entire circuit. This enforces a complete EM simulation, not only of passive subcircuits such as the matching

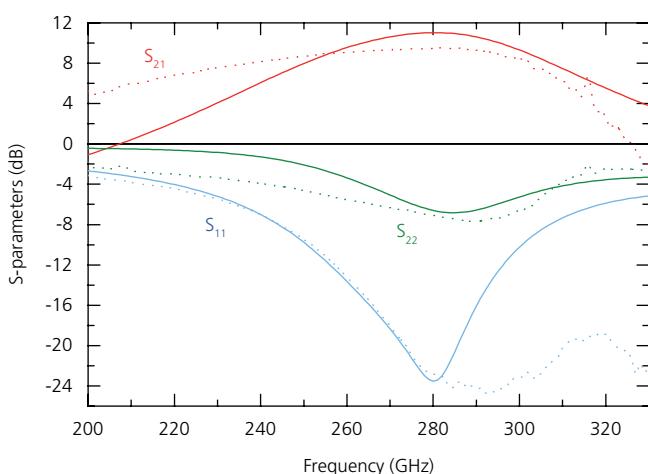
networks between the individual stages of a power amplifier for example, but also of the entire circuit as is shown in Fig. 1, optionally including a multiport simulation of the metallization pattern of multifinger active devices.

It is clear that this increasingly EM simulation-based circuit

beneficial to explore emerging new circuit concepts and topologies exclusively using our in-house technologies, before subsequently transferring them to commercial technologies for customers once a first proof-of-concept has been achieved. A current example of an ongoing study on an emerging circuit concept at mmW frequencies is the »FET stacking« concept. This involves using our mHEMT technologies with gate length of 35 nm and 50 nm and conducting investigations in which we investigate for the mmW frequency range between 240 GHz and 330 GHz.

FET Stacking Power Amplifiers

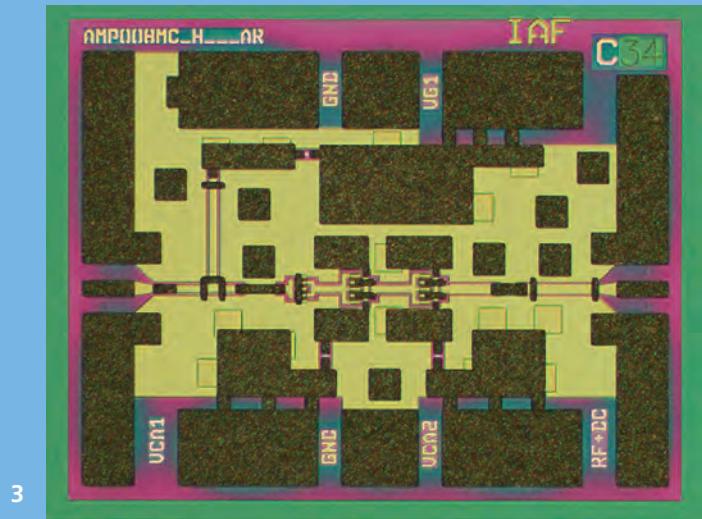
This circuit concept is currently being investigated by US researchers for CMOS technologies up to 90 GHz for the creation of power amplifiers (PAs) with low-voltage technologies with DC operating voltages of 1 V or less, corresponding to breakdown voltages of 2 V or less. Most ultra-fast mmW technologies feature a very low DC supply voltage of around 1 V or less, which turns out to be critical for the generation of sufficient RF power in the output stages for transmitter (TX) applications. The transmitter has to deliver its RF power either into a pre-defined system impedance or into a high-impedance antenna. Using the standard approach of parallel-combining individual FET cells in a power amplifier, its effective total load impedance level decreases due to the current summing of the individual FETs. This means that the realization of the output matching network becomes more and more difficult as the number of FET cells and thus the



4 Measured (dotted lines) and simulated (solid lines) S-parameters of the »stacked-FET« PA.

Gemessene (punktierte Linien) und simulierte (durchgezogene Linien) S-Parameter des »Stacked-FET«-Verstärkers.

design process relies on the specific geometry and material data of the technology used. This is difficult to access in the case of an external foundry. Furthermore, exploring new circuit concepts, such as the aforementioned FET stacking topologies relying on an external foundry, would severely increase the development risk and/or the number of design iterations. Therefore, it is highly



3 Chip photo of the 280 GHz stacked-FET PA.

Chipphoto des 280 GHz

»Stacked-FET«-Verstärkers.

> 10,000

Mesh cells in structure simulation of entire circuits.

Gitternetz-Zellen in der Struktursimulation kompletter Schaltungen.

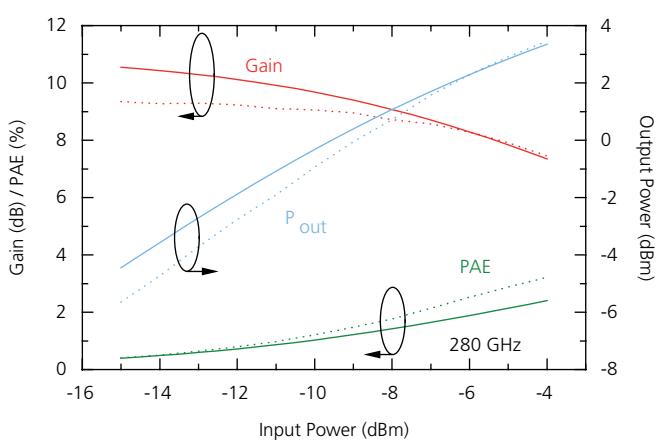
InAlAs/InGaAs-HEMTs und AlGaN/GaN-HEMTs (high electron mobility transistors), mit hochkomplexen, auf elektrischen Ersatzschaltbildern basierenden Modellen präzise beschrieben werden. Darüber hinaus erfordern die passiven Bauelemente, die in monolithisch integrierten Mikrowellen-, mmW- und Sub-mmW-Schaltungen eingesetzt werden, bei immer höheren mmW-Frequenzen eine mehr und mehr verteilte, auf EM-Feldsimulation basierende Beschreibung. Bei höheren Mikrowellen- und mmW-Frequenzen nimmt die elektromagnetische Kopplung zwischen benachbarten passiven und / oder aktiven Substrukturen signifikant zu und wird immer kritischer für die elektrische Funktionalität der gesamten Schaltung. Dies erfordert dann nicht nur eine EM-Simulation, z. B. der Anpassungsnetzwerke zwischen den einzelnen Stufen eines Leistungsverstärkers, sondern eine EM-Simulation der gesamten Schaltung wie in Abb. 1, optional mit einer Multiport-Simulation der komplexen Metallisierungsstrukturen der aktiven Multifinger-Bauelemente.

Diese mehr und mehr EM-basierte Kompetenz im Schaltungsentwurf ist an die spezifischen Material- und Geometriedaten der verwendeten Technologie gekoppelt, die im Fall einer externen Technologie schwer zugänglich sind. Die Exploration neuartiger Schaltungskonzepte wie das erwähnte »FET-Stacking« auf einer externen Foundry würde das Entwicklungsrisiko und / oder die Anzahl der Design-Zyklen signifikant erhöhen. Daher ist es fast zwingend, den ersten Funktionsnachweis für ein neues Schaltungskonzept

zunächst exklusiv auf unseren Prozessen zu erbringen, und erst im zweiten Schritt den Transfer auf eine kommerzielle Technologie für Kunden vorzunehmen. Ein aktuelles Beispiel für die Forschung auf einem neuartigen Schaltungskonzept ist eben das »FET Stacking«, das auf unseren mHEMT-Technologien mit den Gatelängen 50 nm und 35 nm im mmW-Frequenzbereich von 240 GHz bis 320 GHz untersucht wird.

Leistungsverstärker mit »FET Stacking«

Dieses Schaltungskonzept wird derzeit von US-Forschern für CMOS-Technologien bis zu Frequenzen von 90 GHz zur Realisierung von Leistungsverstärkern mit Niedervolt-Technologien mit DC-Spannungen von 1 V und Durchbruchsspannungen von bis zu 2 V untersucht. Die niedrige Betriebsspannung der meisten ultraschnellen mmW-Technologien ist für die Erzeugung von hinreichend hohen HF-Ausgangsleistungen in Senderendstufen kritisch, da der Sender seine Ausgangsleistung entweder an eine fest definierte Systemimpedanz oder an eine hochohmige Antenne abgeben muss. Bei der bekannten Standardmethode der Parallelschaltung einzelner FET-Zellen im Leistungsverstärker sinkt die effektive Gesamt-Ausgangsimpedanz aufgrund der Summation der Ausgangsströme der einzelnen FETs. Daher wird die Realisierung des ausgangsseitigen Anpassungsnetzwerks mit steigender Zahl von FET-Zellen und höherer Ausgangsleistung immer schwieriger. Das neuartige Konzept des »FET Stacking« unter Summation der Ausgangsspannungen der einzelnen Zellen ist hier eine interessante



5 Measured (dotted lines) and simulated (solid lines) output power, gain, and PAE vs. input power of the »stacked-FET« PA.

Gemessene (punktierter Linien) und simulierte (durchgezogene Linien) Ausgangsleistung, Verstärkung und PAE über der Eingangsleistung des »Stacked-FET«-Verstärkers.

output power increases. The new concept of FET stacking or series power combining by means of voltage summing is an interesting alternative here, because the effective load impedance increases with the number of FETs. Although this eases the realization of the output matching network, the main difficulty here lies in making the input drive of all FETs identical. We are currently investigating circuit variants in which each FET drives the next

cell above itself. The output power of such a stack is approximately equal to the output power of a single cell minus its input drive power times the number of FET cells. This results in a significant advantage in power gain compared with a PA with classical parallel combining, for which the power gain is the same as the gain of a single FET cell.

Example: Stacked-FET Power Amplifier at 280 GHz

Fig. 2 shows the circuit schematic of a 3-FET stacked power amplifier that was realized using Fraunhofer IAF's 50 nm InGaAs mHEMT technology and designed for a center frequency of 280 GHz. It comprises simple output and input matching networks at the output (drain) of the third FET and the input

(gate) of the first FET. The output biasing is performed via the RF output connector and an external bias tee in the measurement setup. The capacitors C_1 and C_2 at the gates of the second and the third FET do not provide a short circuit to the ground, but adjust the proper input driving conditions for these FETs. Fig. 3 shows a chip photograph of the amplifier produced. The chip area is only 0.68 mm x 0.58 mm which is smaller than that of comparable power amplifiers using classical parallel combining. Fig. 4 depicts simulated (solid lines) and measured (dotted lines) S-parameters of the stacked-FET PA. In this example, the simulation accuracy remains limited without the full EM simulation of the entire circuit structure. Fig. 5 illustrates a power sweep at a frequency of 280 GHz. Simulated (solid lines) and measured (dotted lines) output power, gain and power-added efficiency (PAE) are plotted vs. input power. Due to the high operating frequency with respect to the current-gain transition frequency, the power-added efficiency (PAE) of the PA remains rather low (approx. 3%). The compression behavior can be accurately predicted by employing the distributed large-signal model of the FETs used in the MMIC. The power, PAE, and gain performance of this first stacked PA are already comparable to the results recently published by other research groups for classical GaAs MMIC PAs in the same frequency range. It is worth noting that results for MMIC PAs using stacked FETs beyond 90 GHz have not yet been published.

Alternative, weil die effektive Lastimpedanz mit der Zahl der FETs ansteigt. Das vereinfacht zwar die Realisierung des ausgangsseitigen Anpassungsnetzwerks, jedoch besteht hier die primäre Schwierigkeit darin, eine identische eingangsseitige Ansteuerung aller FETs zu erreichen. Wir untersuchen dazu gegenwärtig Schaltungsvarianten, in denen jeder einzelne FET den nächsthöheren FET eingangsseitig treibt. Die Ausgangsleistung eines derartigen »FET-Stapels« ist annähernd die Leistung einer einzelnen Zelle minus der erforderlichen Eingangsleistung einer Zelle, multipliziert mit der Anzahl der Zellen. Das bedingt einen signifikanten Vorteil im Verstärkungsfaktor des »FET-Stapels« im Vergleich zu einer klassischen Parallelschaltung, da deren Leistungsverstärkung gleich derjenigen der einzelnen FET-Zelle ist.

Beispiel: Leistungsverstärker mit »FET Stacking« bei 280 GHz

In Abb. 2 ist das Schaltbild eines Leistungsverstärkers mit 3 »gestapelten« FETs dargestellt, der in der 50 nm-InGaAs-mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF realisiert und für eine Mittenfrequenz von 280 GHz entworfen wurde. Die Schaltung enthält einfache Eingangs- und Ausgangsanpassungsnetzwerke am Drain des dritten FETs und am Gate des ersten FETs. Die ausgangsseitige DC-Versorgung wird einfach über den Anschluss des HF-Ausgangs und das Bias-Netzwerk des Messaufbaus realisiert. Die Kapazitäten C_1 und C_2 an den Gates des zweiten und dritten FETs bilden keinen Kurzschluss zur Masse,

sondern stellen die eingangsseitige Ansteuerung der beiden oberen FETs sicher. Abb. 3 zeigt ein Photo des Verstärker-MMICs. Die Chipfläche beträgt nur 0,68 mm × 0,58 mm, was deutlich kleiner ist als die typische Fläche vergleichbarer klassischer Leistungsverstärker. Abb. 4 vergleicht die simulierten (durchgezogene Linien) und gemessenen (gepunktet) S-Parameter des Verstärkers. In diesem Beispiel wird – hier noch ohne EM-Simulation des kompletten Verstärkers – keine übermäßig gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erreicht. Abb. 5 zeigt bei einer Frequenz von 280 GHz die Ausgangsleistung, die Verstärkung und den Wirkungsgrad (PAE) als Funktion der Eingangsleistung im Vergleich zwischen Messung (gepunktet) und Simulation (durchgezogene Linien). Der Wirkungsgrad des Verstärkers bleibt aufgrund der im Vergleich zur Transitfrequenz der FETs recht hohen Betriebsfrequenz mit etwa 3 % relativ niedrig. Das Kompressionsverhalten der Verstärkung wird vom hier verwendeten, verteilten FET-Modell recht genau vorhergesagt. Die Daten des Verstärkers bezüglich Ausgangsleistung, Verstärkung und PAE sind bereits vergleichbar mit ähnlichen, von anderen Forschergruppen in der letzten Zeit veröffentlichten Ergebnissen mit klassischen Verstärkern im gleichen Frequenzbereich. Abschließend bleibt zu erwähnen, dass MMIC-Leistungsverstärker nach dem Prinzip des »FET Stacking« bisher für Frequenzen oberhalb 90 GHz noch nicht veröffentlicht wurden.

INSTITUTE IN FIGURES

92

Institut in Zahlen

94

Organisationsstruktur

96

HIGHLIGHTS 2016/2017

Höhepunkte 2016/2017

APPENDIX

○ Anhang

- 100 **PATENTS**
Patente
- 101 **EDUCATION AND TEACHING**
Ausbildung und Lehre
- 104 **COMMITTEES, CONFERENCES, FAIRS**
Gremien, Tagungen, Messen
- 107 **AWARDS AND GUESTS**
Auszeichnungen und Gäste
- 108 **PUBLISHING NOTES**
Impressum

Institute in Figures

Institut in Zahlen

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

In 2016, Fraunhofer IAF had an operating budget of 25.8 million €. This marks a slight increase from the previous year, which can be mainly attributed to the growth in personnel expenses to 15.6 million €. Material expenses actually decreased due to relatively low energy costs. After several record years, investments were kept at a deliberately low level of 3.7 million €, in line with the long-term investment plan. A significant rise in investments is already planned for 2017.

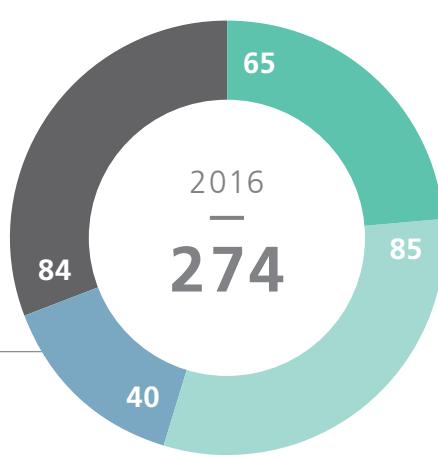
At around 55 %, in 2016 the majority of the operating budget and investments was once again financed by the German Federal Ministry of Defense (BMVg). Industrial revenues remained at the previous year's level of 3.5 million €, which represents a share of about 30 % of the civilian research activities. The overall budget continues to be well-funded, meaning that a positive operating result could be achieved in 2016.

The number of full-time equivalent employees rose to 204 in 2016. The absolute number of employees stood at 274. The percentage women working at Fraunhofer IAF climbed to 37 %. Of these 274 employees, 190 are researchers, while 84 work in infrastructure (including managerial positions). Of the employees conducting research, 40 were working on their PhD or master's thesis. Seven staff members were employed 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

- 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
Doktoranden / Diplomanden in Fachabteilungen
- INFRASTRUCTURE & MANAGEMENT
Infrastruktur und Leitung

Im Jahr 2016 erzielte das Fraunhofer IAF einen Betriebshaushalt in Höhe von 25,8 Mio. € und lag damit leicht über dem Vorjahresniveau, wofür hauptsächlich die auf 15,6 Mio. € gestiegenen Personalaufwendungen verantwortlich waren. Bei den Sachaufwendungen konnte sogar dank relativ niedriger Energiekosten ein Rückgang verzeichnet werden. Die Investitionen wurden nach mehreren Rekordjahren im Rahmen einer längerfristigen Investitionsplanung mit ca. 3,7 Mio. € gezielt niedrig angesetzt. Schon für das Jahr 2017 ist wieder ein signifikanter Anstieg geplant.

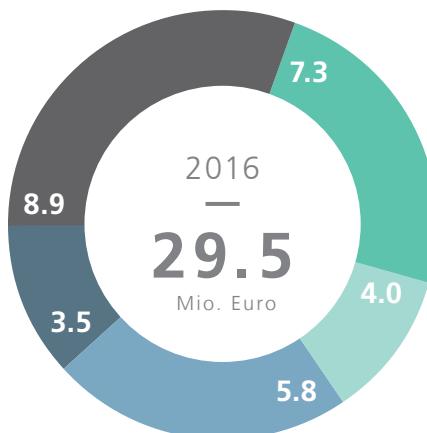
Der größte Teil des Betriebshaushalts und der Investitionen wurde auch 2016 vom BMVg mit einem Anteil von etwa 55 % finanziert. Die Industrieerträge blieben mit 3,5 Mio. €, was einen Anteil von 30 % an den zivilen Forschungsaktivitäten bedeutet, knapp auf dem Vorjahresniveau. Der Gesamthaushalt war weiterhin sehr gut finanziert. Auch in 2016 konnte ein positives operatives Ergebnis erzielt werden.

Die Zahl der Vollzeit-äquivalenten Beschäftigten stieg in 2016 auf 204. Die absolute Zahl der Beschäftigten lag bei 274 Mitarbeitern. Der Anteil der weiblichen Beschäftigten stieg auf 37 %. Von den 274 Beschäftigten sind 190 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 bzw. im Rahmen ihres Studiums an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg am Fraunhofer IAF beschäftigt.

TOTAL BUDGET FINANCING

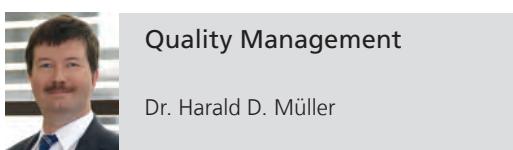
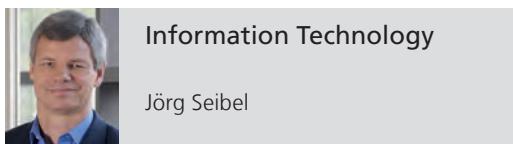
Finanzierung Gesamthaushalt

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

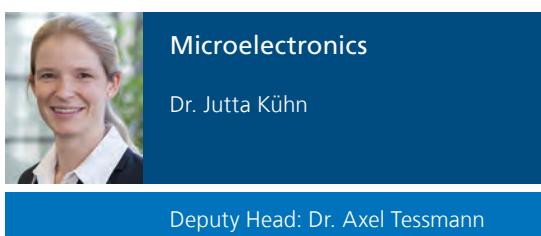
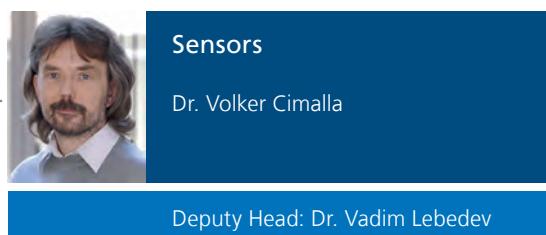
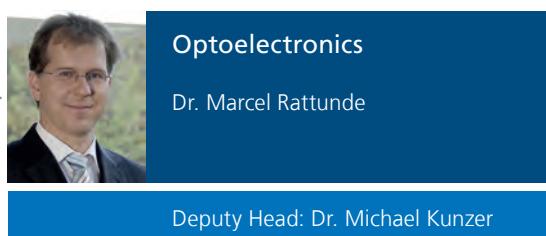


Organizational Structure

Organisationsstruktur



Scientific Departments





Executive Director (acting)
Division Director
Business Units

Prof. Dr. Joachim Wagner



Administration

Dr. Beatrix Schwitalla

Deputy Head: Claudia Daghero



Public Relations

Michael Teiwas



Marketing

Dr. Anne-Julie Maurer



High Frequency Electronics

Dr. Michael Schlechtweg

Deputy Head: Dr. Axel Hülsmann



Photodetectors

Dr. Robert Rehm

Deputy Head: Dr. Volker Daumer



Power Electronics

Dr. Rüdiger Quay

Deputy Head: Dr. Patrick Waltereit



Semiconductor Lasers

Dr. Ralf Ostendorf

Deputy Head: Jan-Philip Jarvis



Diamond Devices

Dr. Christoph Nebel

Deputy Head: Dr. Verena Zürbig

Highlights 2016/2017

Höhepunkte 2016/2017

FUTURE SECURITY

AUTONOMOUS DRIVING AND CIVIL DRONES — Which sensors improve the safety of autonomous cars? How can the misuse of civil drones be prevented? Which safety technology is suitable for efficient border control? More than 200 experts from research, industry, and politics discussed these and other topics at the security conference »Future Security« held in Berlin on September 13 – 14. They recommended linking optical sensors with radar technologies in order to ensure autonomous cars stay safe on the road. They also emphasized the need for stronger cooperation between radar and IT experts. According to former Daimler manager Holger Meinel, this is advantageous for the German economy, as the high-frequency and radar technology provides the country with a leading edge against the United States, for example.

A further topic of discussion was the risk of civil drones being misused as »toys for everybody«, as stated by Martina Link from the Federal Criminal Police Office. Experts are calling for stronger regulations for civil unmanned aircrafts, as well as for closer cooperation between stakeholders from industry, economy, and science. Organised on an annual basis by the Fraunhofer Group of Defence and Security VVS, the »Future Security« conference acts as a platform for researchers, experts, and key players from science, industry, and politics to share their knowledge and experiences.

Autonomes Fahren und zivile Drohnen — Welche Sensoren machen selbstfahrende Autos sicherer? Wie kann der Missbrauch ziviler Drohnen verhindert werden? Welche Sicherheitstechnik ist für effizienten Grenzschutz geeignet? Über 200 Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik diskutierten am 13. und 14. September in Berlin auf der Sicherheitskonferenz »Future Security«. Sie sprachen sich für eine Kopplung optischer Sensoren mit Radartechnologien aus, um Sicherheit im Straßenverkehr mit selbstfahrenden Autos zu gewährleisten. Auch müssten Radarexperten verstärkt mit IT-Spezialisten kooperieren. Der ehemalige Daimler-Manager Holger Meinel sieht dabei einen Vorteil für die europäische Wirtschaft, da es in der Hochfrequenz- und Radartechnik einen großen Vorsprung beispielsweise gegenüber den USA gäbe.

Thematisiert wurde auch das Risiko des Missbrauchs ziviler Drohnen als »Spielzeug für jedermann«, so Martina Link vom Bundeskriminalamt. Experten fordern eine stärkere Regulierung für zivile unbemannte Flugsysteme und eine intensivere Zusammenarbeit zwischen Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft. Die »Future Security« ist eine Plattform zum Austausch zwischen Forschern, Experten und Akteuren aus Wissenschaft, Industrie und Politik und wird jährlich vom Fraunhofer-Verbund für Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS organisiert.



SENSOR + TEST

RADAR WITH ALL-ROUND VIEW — From May 10 – 12, Fraunhofer IAF presented its radar with an all-round view for industry 4.0 applications at this year's Sensor + Test in Nuremberg. The high-frequency radar scans its surroundings in a 360° radius and outperforms optical sensors when vision is obstructed by plastic panels, dust, or smoke. In the future, the radar shall prevent people from colliding with robots in production and manufacturing settings, thereby making human-machine interaction safer.

Radar mit Rundumblick — Einen Radar mit Rundumblick für die Industrie 4.0 präsentierte das Fraunhofer IAF auf der diesjährigen Sensor+Test vom 10. – 12. Mai in Nürnberg. Der Hochfrequenz-Radar erfasst die Umgebung im 360-Grad-Radius und ist optischen Sensoren überlegen, wenn Kunststoffplatten, Staub oder Rauch die Sicht einschränken. Er soll zukünftig Menschen vor Kollisionen mit Robotern in der Fertigung und Produktion bewahren und so für Sicherheit in der Mensch-Maschine-Kollaboration sorgen.



HANNOVER MESSE



LASERS AND RADAR FOR INDUSTRY 4.0 — »Integrated Industry – Discover Solutions«. This was the motto of the Hannover Messe held from April 25 – 29. Fraunhofer IAF presented new developments in laser spectroscopy and radar sensing that can easily be integrated into running production processes. With the help of quantum cascade lasers, for example, it is possible to detect contaminated liquids or spoiled food.

Laser und Radar für Industrie 4.0 — »Integrated Industry – Discover Solutions«. Unter diesem Motto stand die diesjährige Hannover Messe vom 25. – 29. April. Hierzu zeigte das Fraunhofer IAF neue Entwicklungen in der Laserspektroskopie und der Radarsensorik, die sich in laufende Produktionsprozesse problemlos integrieren lassen. Beispielsweise können mit Hilfe von Quantenkaskadenlasern verunreinigte Flüssigkeiten oder auch verdorbene Lebensmittel zuverlässig und schnell entdeckt werden.

INDUSTRY APPLICATION DAY

SENSORS FOR INDUSTRY 4.0 — Sensors are not only expected to perform measurements, but to automatically process, analyze, and transfer data as well. Industry 4.0 applications require intelligent sensors capable of fulfilling these complex signal processing demands. During the Industry Application Day at Fraunhofer IAF on November 16, around 60 experts shared information and opinions on intelligent sensors, their links to IT and communication systems, as well as the political framework for industry 4.0. One of the speakers, Alexander Aberle from SICK AG, explained which novel sensors are being developed to facilitate the remote detection of emissions or the analysis of air quality in industrial settings. Using keywords such as »Smart Factory« or »Smart Services«, Marco Arnold from local company Arnold IT outlined the importance of close connections between IT and sensing. Claus Mayer, industry 4.0 coordinator at the Ministry for Economy, Employment and Housing of Baden-Württemberg, presented funding programs that give even small and medium-sized enterprises the chance to keep pace with industry 4.0 developments.

From rapid data transmission via radio frequency and precise measurements with radar sensors, which even penetrate dust, fog, or smoke to the identification of contaminants in real time using laser spectroscopy, with its various research and development activities, Fraunhofer IAF is helping to pave the way to industry 4.0. Fraunhofer IAF will therefore continue to organize Industry Application Days and similar events in the future, in order to connect the various key players from research, industry, and politics.



Sensorik für Industrie 4.0 — Sensoren sollen nicht nur messen, sondern auch Daten automatisch verarbeiten, analysieren und weitergeben. Für die Industrie 4.0 werden intelligente Sensoren benötigt, die diese komplexe Signalverarbeitung leisten können. Beim Industrietag am 16. November am Fraunhofer IAF tauschten sich rund 60 Experten zu intelligenten Sensoren, deren Vernetzung mit IT- und Kommunikationssystemen sowie den politischen Rahmenbedingungen für Industrie 4.0 aus. So zeigte unter anderem Alexander Aberle von der SICK AG, welche neuen Sensoren für die berührungslose Detektion von Emissionen oder die Analyse der Luftqualität in industriellen Umgebungen entwickelt werden. Unter Schlagworten wie »Smart Factory« oder »Smart Services« zeigte Marco Arnold von der Freiburger Firma Arnold IT, wie bedeutsam die Vernetzung von IT und Sensorik ist. Claus Mayer, Koordinator für Industrie 4.0 am Landesministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau, stellte unter anderem Förderprogramme vor, die auch kleinen und mittelständischen Unternehmen einen Anschluss an die Industrie 4.0 ermöglichen.

Die schnelle Übertragung hoher Datenraten per Funk, die präzise Messung per Radar selbst bei Rauch, Staub und Nebel oder die Identifikation von Verunreinigungen in Echtzeit mittels Laserspektroskopie: die technologischen Weichen für Sensorik in der Industrie 4.0 werden am Fraunhofer IAF mit verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gestellt. Daher wird das Fraunhofer IAF auch zukünftig Industrietage und ähnliche Veranstaltungen anbieten, um die verschiedenen Akteure aus Wissenschaft, Industrie und Politik zu vernetzen.



RESEARCH FAB

KICK-OFF FOR THE »RESEARCH FAB MICROELECTRONICS GERMANY« — On April 6, 2017, Prof. Johanna Wanka handed over the grant approval for the »Research Fab Microelectronics Germany«: In order to strengthen the European semiconductor industry against global competition the Fraunhofer Institutes of the Group for Microelectronics together with two institutes of the Leibniz Association have developed a concept for a joint fab for research for nano- and microelectronics. The Federal Ministry for Education and Research (BMBF) is funding the required investments with an amount of 350 M€. The consortium is aiming to provide the complete value chain for nano- and microelectronics efficiently from one source. Technology offerings are handled across institutes in four technology parks – »Silicon-based technologies«, »Compound semiconductors and special substrates«, »Heterointegration« and »Design, test and reliability«. Fraunhofer IAF coordinates the technology park »Compound semiconductors«. In order to build and expand the required capabilities, IAF will invest 15.6 M€ in new equipment for epitaxy, processing, packaging and measurement technology.

Startschuss für die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« — Am 6. April 2017 übergab Prof. Johanna Wanka die Bewilligungsbescheide für die »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland«: Um die Position der europäischen Halbleiterindustrie im globalen Wettbewerb zu stärken, haben die Institute des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik gemeinsam mit zwei Instituten der Leibniz-Gemeinschaft das Konzept für eine »Forschungsfabrik für Mikro- und Nanoelektronik« erarbeitet. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt die dazu nötigen Investitionen mit einer Fördersumme in Höhe von 350 Mio. €. Das Ziel ist es, die gesamte Wert schöpfungskette für die Mikro- und Nanoelektronik unkompliziert aus einer Hand anbieten zu können. Das institutsübergreifende Technologieangebot wird in vier »Technologieparks« gegliedert – »Silizium-basierte Technologien«, »Verbindungshalbleiter«, »Heterointegration« und »Design, Test und Zuverlässigkeit«. Das Fraunhofer IAF koordiniert den Technologiepark »Verbindungshalbleiter«. Um hier die nötigen Fähigkeiten weiter auf- und auszubauen, werden am Fraunhofer IAF 15,6 Mio. € in neue Anlagen für Epitaxie, Prozessierung, Aufbau- und Verbindungs technik sowie Messtechnik investiert.



CORPORATE FILM



AWARD-WINNING CORPORATE FILM — Fraunhofer IAF's corporate film received the silver award in the category of technology, research, and development at the 27th International Business Film Days in Vienna. The three-minute video titled »Small Devices – Great Impact« presents the latest research findings and how their applications are used. Special attention was paid to the people behind the research activities, namely Fraunhofer IAF's employees.

Ausgezeichneter Imagefilm — Auf den 27. Internationalen Wirtschaftsfilmtagen in Wien wurde der Imagefilm des Fraunhofer IAF in der Kategorie Technologie, Forschung und Entwicklung mit Silber prämiert. Das etwa dreiminütige Video mit dem Titel »Small Devices – Great Impact« zeigt aktuelle Forschungs- und Entwicklungsthemen sowie deren Anwendung. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Menschen hinter den Forschungsarbeiten, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fraunhofer IAF, gelegt.

Patents

Patente

Granted Patents

Patenterteilungen

A. Leuther, A. Tessmann, R. Lösch

Pseudosubstrat zur Verwendung bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und Verfahren zur Herstellung eines Pseudosubstrates

US 9,263,248 B2, 16.02.2016; USA (US)

C. Nebel, W. Müller-Sebert, C. Widmann, C. Schreyvogel, N. Lang Substrathalter, Plasmareaktor und Verfahren zur Abscheidung von Diamant

DE 10 2014 223 301 B3, 10.03.2016; Deutschland (DE)

R. Reiner

Schaltungsanordnung

US 9,331,193 B2, 03.05.2016; USA (US)

M. Seelmann-Eggebert

Verfahren zum Charakterisieren von Mikrowellenbauelementen

DE 10 2014 119 331 B4, 25.08.2016; Deutschland (DE)

Q. Yang, C. Manz

Unipolarer Quantenkaskaden-Laser hoher Effizienz

502008014656.3, 28.09.2016; Deutschland (EP-DE)

EP 2 109 922 B1, 28.09.2016; Europäisches Patent (EP)

K. Köhler, S. Müller, P. Waltereit

Method for determining the structure of a transistor

6033682, 04.11.2016; Japan (JP)

Patent Applications

Patentanmeldungen

C. Nebel, C. Widmann

*Epitaktische Diamantschicht und Verfahren zu ihrer Herstellung
14/996,835, 15.01.2016; USA (US)*

R. Hoffmann, C. Nebel, S. Roscher

*Vorrichtung und Verfahren zur Expansion von Graphit zu Graphen
10 2016 202 202.4, 12.02.2016; Deutschland (DE)
PCT/EP2016/073451, 30.09.2016; Weltorganisation für geistiges Eigentum (WO)*

F. Benkhelifa

Halbleiterbauelement

10 2016 211 532.4, 27.06.2016; Deutschland (DE)

P. Waltereit, K. Köhler

*Halbleiterbauelement und Verfahren zu dessen Herstellung
10 2016 223 622.9, 29.11.2016; Deutschland (DE)*

Education and Teaching

Ausbildung und Lehre

Academic Lectures and Seminars

Vorlesungen und Seminare

Oliver Ambacher

*Nanobiotechnologie;
Universität Freiburg/Br., SS 2016
Verbindungshalbleiter Mikrosysteme;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016, WS 2016/2017*

Dominik Meier

*Erstsemesterprojekt Teambildung, Programmierung NAO-Roboter;
Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2015/2016,
SS 2016
Optoelektronik;
Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2015/2016,
SS 2016*

Christoph Nebel

*Solid State and Semiconductor Physics;
Universität Freiburg/Br., SS 2016*

Rüdiger Quay

*RF and Microwave Circuits and Systems;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016, WS 2016/2017
RF and Microwave Devices and Circuits;
Universität Freiburg/Br., SS 2016
Design Course: RF and Microwave Circuits and Systems
Universität Freiburg/Br., SS 2016
Power Electronics: Devices and Concepts;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016, WS 2016/17
Renewable Energy Management (REM) Elective Track Energy
Systems: Hardware and Control, Universität Freiburg/Br.,
WS 2015/2016, WS 2016/17*

Lutz Kirste

*Theory and Applications of X-ray Diffractometry;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016*

Matthias Ohlrogge

*HF-Technik in der Schaltungstechnik
Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach, WS 2015/2016*

Fabian Thome

*Elektrotechnisches Grundpraktikum
Universität Freiburg/Br., SS 2016*

Joachim Wagner

*Grundlagen der Halbleiterphysik;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016, WS 2016/2017
Aktuelle Probleme der Festkörperphysik und der
Materialforschung;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016*

Martin Walther

*Quanteneffektbauelemente und Halbleitertechnologie;
Karlsruher Institut für Technologie KIT, SS 2016*

Beatrix Weiß

*Elektrotechnisches Grundpraktikum
Universität Freiburg/Br., SS 2016*

Doctoral Theses

Promotionen

Björn Albrecht

Epitaxie und Charakterisierung von UV-Photodetektoren auf der Basis des AlGaN-Schichtsystems; Universität Freiburg/Br.

Nayeli Espinosa

Dynamic Detection of Target DANN with AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors; Universität Freiburg/Br.

Fang Gao

*Towards Surface-Enlarged Diamond Materials;
Universität Freiburg/Br.*

Christian Goßler

*Hochparallele Integration von nitridischen Mikro-Leuchtdioden auf flexiblen Sonden für die Anwendung in der Optogenetik;
Universität Freiburg/Br.*

Philipp Kleinow

InGaAs-Avalanche-Photodioden für bildgebende Verfahren im kurzwelligen Infrarot; Universität Freiburg/Br.

Markus Mischo

*Indium oxide based photostimulated ozone sensor;
Universität Freiburg/Br.*

Matthias Ohlrogge

*Charakterisierung und Modellierung von metamorphen HEMT Strukturen im Millimeter- und Submillimeter-Wellenlängenbereich;
Universität Freiburg/Br.*

Christoph Schreyvogel

Dynamische Manipulation von NV-Zentren im Diamant für Quantenoptik; Universität Freiburg/Br.

Ernst Weissbrodt

*Active Electronic Loads for Radiometric Calibration;
Universität Stuttgart*

Verena Zürbig

*Piezo-aktivierte mikro-opto-elektromechanische Systeme für aktive Mikrooptik;
Universität Freiburg/Br.*

Master Theses

Masterarbeiten

Roshna George

Investigation of System Parameters for Increasing the Imaging Speed and Image Quality of a MIMO Millimeter Wave Camera;
Universität Freiburg/Br.

Laurenz John

Integrierte ultra-breitbandige Basisband-Schnittstellenverstärker für die 100 Gbit/s Millimeterwellen-Richtfunktechnik;
Karlsruher Institut für Technologie

Jana Ligl

Structural Analysis of Diamond Substrates and Homoepitaxial Diamond Layers; Universität Freiburg/Br.

Dakkshinamurthi Pan Subramanian

Photo-electron emission from phosphorus doped and nano-textured diamond films for CO₂ reduction; Universität Freiburg/Br.

Anand Mohanan Sreekumari

Investigations of hybrid high-efficiency AlGaN/GaN packaged power amplifier design in C-frequency band for future 5G networks;
Universität Freiburg/Br.

Lukas Stolch

Etablierung einer Messtechnik zur quantitativen Gain-Bestimmung von Avalanche-Photodioden; Universität Freiburg/Br.

Timothy Trost

Growth and Characterization of Intrinsic and Boron Doped Single Crystal Diamond; Universität Freiburg/Br.

Markus Weiß

Evaluation, design and realisation of a Riemann Pump for the frequency range of 0.6 GHz for 5G mobile communication;
Universität Freiburg/Br.

Bachelor Theses

Bachelorarbeiten

Jan Grießer

Vergleichende thermische Untersuchungen von Leistungsbauelementen; Universität Freiburg/Br.

Julia Anna Popko

Generation und Charakterisierung von NV-Zentren in Diamant mittels Stickstoff-Gasphasen-Dotierung; Universität Freiburg/Br.

Committees, Conferences, Fairs Gremien, Tagungen, Messen

Committee Activities

Arbeit in Fachgremien

Oliver Ambacher

- *Board of Directors, Fraunhofer UK »Center for Applied Photonics CAP«, Strassclyde (UK); Member*
- *Advisory Board Freiburger Materialforschungszentrum FMF, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Member*
- *Scientific Advisory Board Leibnitz-Institut für Analytische Wissenschaften ISAS, Dortmund; Vice Chairman*
- *COMET Strategy Board, CTR Carinthian Tech Research, Villach, Austria; Member*
- *German Science Foundation, Scientific Board for Condensed Mater (307/310); Member*
- *Conference Chair »Future Security – 11th Security Research Conference 2016«; Sensor Systems for Safety and Security*

Martina Baeumler

- *International Steering Committee »International Conference 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*
- *Program Committee »International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2016)«; Member*

Michael Dammann

- *Technical Program Committee »European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis ESREF 2016«; Member*

Arnulf Leuther

- *Program Committee » European Microwave Week EuMW 2016«; Member*

Michael Mikulla

- *Advisory Board »IAP 1 CapTech European Defence Agency«; Member*

Christoph E. Nebel

- *Advisory Board »International Conference on New Diamond and New Carbon«; Member*
- *Program committee »International Conference on Diamond and Carbon Materials«; Member*
- *Technical Advisory Committee »IDA Industrial Diamond Association of America«; Member*
- *Peer Review College »EPSRC Engineering and Physical Sciences Research Council UK«; 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
- Program committee »GeMiC German Microwave Conference 2016«; Member
- Technical Program Committee »International Microwave Symposium IMS 2016«; Member
- Associate Editor »IEEE Electron Device Letters«
- Associate Editor »International Journal of Microwave and Wireless Technologies«

Robert Rehm

- Conference Chair »43rd Freiburg Infrared Colloquium 2017«

Frank Rutz

- Gremium »VDI/VDE-GMA Fachausschuss 8.16 Temperaturmessung mit Wärmekameras«; Member
- Program Committee »3rd 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

- Program Committee »Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices MIOMD-XIII«; Member
- Program Committee »Future Security – 11th Security Research Conference 2016«; Sensor Systems for Safety and Security; Member

Martin Walther

- Program Committee »Infrared Sensors and Systems IRS2 2016«; Member
- Program Committee »International Symposium on Optronics in Defense and Security 2016«; Member
- Program Committee »Compound Semiconductor Week 2017«; Chair

Conference Organisation

Tagungsorganisation

Rüdiger Quay, Roger Kaul, Nils Pohl

International Microwave Symposium IMS 2016

Student Design competitions »SDC-6«

San Francisco, May 22 – 27, 2016

Oliver Ambacher, Joachim Wagner, Rüdiger Quay

Future Security – 11th Security Research Conference 2016

Berlin, September 13 – 14, 2016

Lutz Kirste

E-MRS Fall Meeting 2016

Symposium: Nitride semiconductors for high power and high frequency electronic devices II

Warsaw, September 19 – 22, 2016

Christoph Nebel

E-MRS Fall Meeting 2016

Symposium: Diamond for electronic devices

Warsaw, September 19 – 22, 2016

Industrietag »Sensorik für Industrie 4.0«

Freiburg/Br., November 16, 2016

43rd Freiburg Infrared Colloquium

Freiburg/Br., March 14 – 15, 2017

Exhibitions and Fairs

Ausstellungen und Messen

SPIE Defense + Commercial Sensing 2016

April 17 – 21, Baltimore

Hannover Messe 2016

April 25 – 29, Hannover

SENSOR+TEST 2016

Mai 10 – 12, Nuremberg

European Microwave Week 2016

October 3 – 7, London

Semicon Europa 2016

October 25 – 27, Grenoble

Awards and Guests

Auszeichnungen und Gäste

Awards

Auszeichnungen

Ana-Belén Amado Rey

GaAs Association Student Fellowship, European Microwave

Week 2016

EuMIC Young Engineer Prize, European Microwave Week 2016

Best Student Paper Award, Asia Pacific Microwave Conference 2016

»A 280 GHz Stacked-FET Power Amplifier Cell using 50 nm Metamorphic HEMT Technology«

Olivia Lehmann

Best Final Thesis Award, vocational training as technician for the graduation year's 2016 at Richard-Fehrenbach industrial school, Freiburg

»Development, design, construction and mounting of a mechanism for a radar scanner«

Richard Reiner, Patrick Waltereit

Best Paper Award, International Symposium on Power Semiconductor Devices and Integrated Circuits 2016

»Integration of GaN HEMTs onto Si CMOS«

Guest Scientists

Gastwissenschaftler

Taira Tabakoya

Kanazawa University, Japan

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

Executive Director (acting)

Geschäftsführender Institutsleiter (kommissarisch)
Prof. Dr. Joachim Wagner

Director (acting)

Institutsleiter (kommissarisch)
Dr. Martin Walther

Public Relations

Michael Teiwes
Tel. +49 761 5159-450
michael.teiwes@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 2017

Editorial Board / Redaktion

Julia Roeder,
Swenja Broschart, Sandra Iselin,
Sonja Kripendorf, Joachim Wagner

Concept and Layout / Konzept und Layout
bemerkt gestaltung+kommunikation

Layout, Typesetting, Printing / Layout, Satz, Druck
netsyn, Joachim Würger, Freiburg

Photos

Fotos

Sasint – Fotolia.com (pp. 18 – 19);
industrieblick – Fotolia.com (p. 20);
iStock.com/fmajor (p. 23 left);
Cybrain – Fotolia.com (p. 24);
OSRAM (p. 28 right);
Wikimedia Commons/Shigeru23 (p. 30);
Kadmy – Fotolia.com (p. 32);
Petair – Fotolia.com (p. 42);
Stephan Dinges – Fotolia.com (p. 46);
pattilabelle – Fotolia.com (p. 54);
iStock.com/Chris Rogers (p. 58);
marcel_d – Fotolia.com (p. 62);
Fraunhofer IAF – Sandra Iselin, Liane Marek, Oliver Korn



Fairs and Conferences 2017

Messen und Veranstaltungen 2017

Freiburger Infrarot-Kolloquium

14.03.–15.03.2017

Hannover Messe

24.04.–28.04.2017

Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM), Nürnberg

16.05.–18.05.2017

Compound Semiconductor Week (CSW), Berlin

14.05.–18.05.2017

Fraunhofer-Industrieforum, Freiburg

21.06.–22.06.2017

Laser Messe, München

26.06.–29.06.2017

Wissenschaftsmarkt, Freiburg

14.07.–15.07.2017

European Microwave Week (EuMW), Nürnberg **08.10.–13.10.2017**

Productronica/SEMICON, München

14.11.–17.11.2017

