



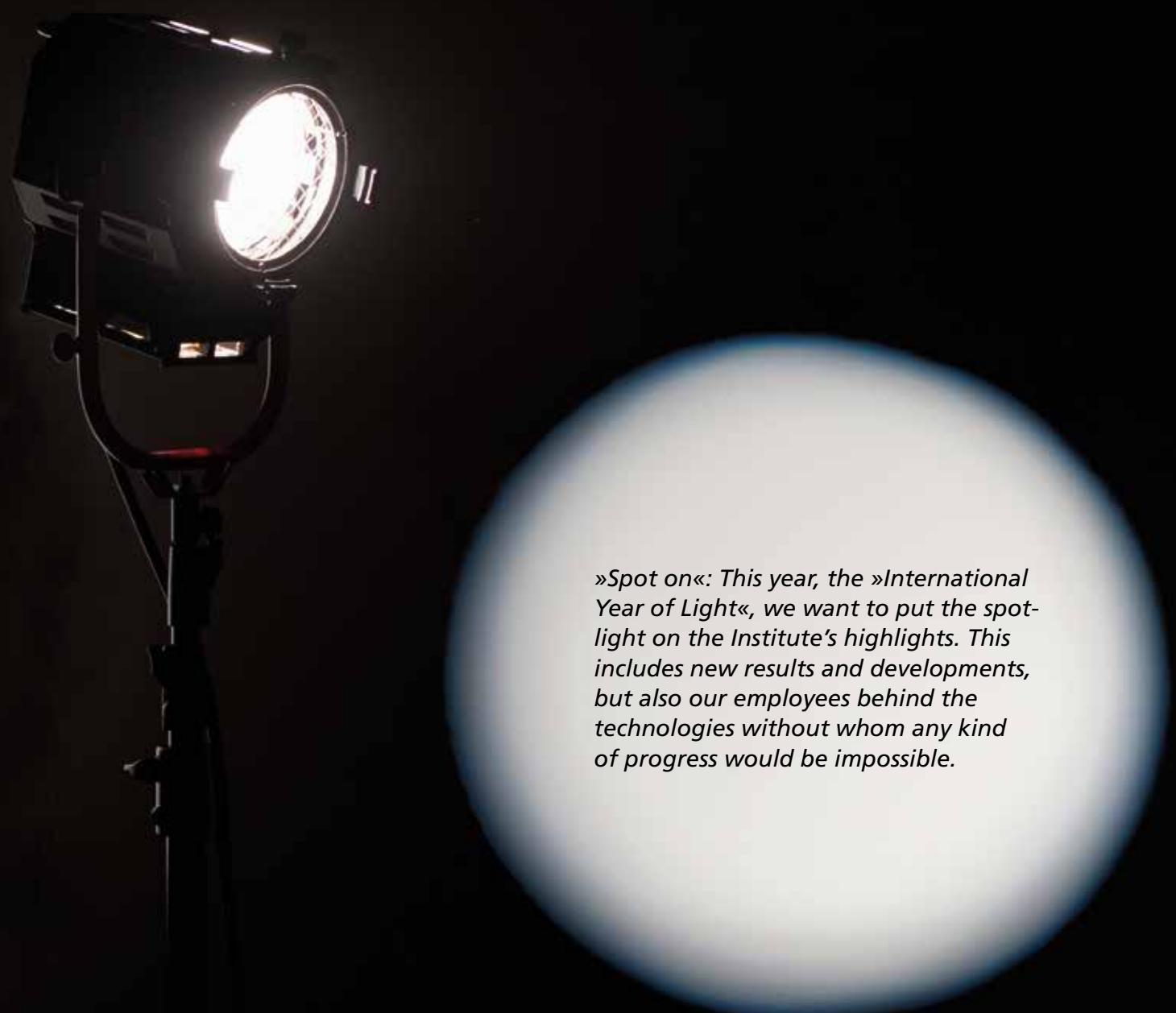
Fraunhofer
IAF

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF



**ANNUAL REPORT
JAHRESBERICHT
2014/2015**

SPOT ON – FRAUNHOFER IAF



»Spot on«: This year, the »International Year of Light«, we want to put the spotlight on the Institute's highlights. This includes new results and developments, but also our employees behind the technologies without whom any kind of progress would be impossible.



»Spot on«: In diesem Jahr, dem »Internationalen Jahr des Lichts«, wollen wir die Highlights des Instituts beleuchten. Hierzu gehören neue Ergebnisse und Entwicklungen, aber auch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter hinter den Technologien, ohne die jeglicher Fortschritt unmöglich wäre.



**ANNUAL REPORT
JAHRESBERICHT
2014/2015**

DIALOG WITH OLIVER AMBACHER

GESPRÄCH MIT OLIVER AMBACHER

SPOT ON – FRAUNHOFER IAF

Mr. Ambacher, you have been the director of the Institute since 2007, what are the first three words that come to your mind when you think of the Fraunhofer IAF?

Excellence in research, compound semiconductors and scientific creativity.

And what exactly arises from this combination?

Crystal layers of different, linked atoms – the best grease for electrons that you can imagine. This produces tremendously powerful electronics and particularly efficient optoelectronics, which in turn find their application, for example, in mobile communication or chemical analysis.

Although silicon is the most widely used semiconductor, Fraunhofer IAF is not the only institution that conducts research on promising III-V semiconductors. What distinguishes Fraunhofer IAF from all the others?

We are the only ones in Europe who work on all levels – from basic research in the field of compound semiconductors right up to the functioning device. Starting with material and technology development, we develop a product that you can finally put on the table and turn on – and it works.

Which indeed corresponds to the profile of Fraunhofer as an organization for applied research. Is that also the origin of the trend towards systems?

As a Fraunhofer Institute, we are somewhere in between a medium-sized company and university research. That means we have graduate students who explore new topics, but also developers and engineers who build systems. This allows us to bridge the gap between science and application.

The income from the systems allows us to invest in new topics and materials research in the long run.

What makes a system successful, apart from innovative technology?

One must recognize the right trend early on, because it often takes years from defining the demand to the actual application of the product. The probability to gain customers, however, increases with the speed with which we can offer a solution. Therefore, we must work on the development of the systems years in advance.

How does one find such trends?

This year we have become aware of the material aluminum scandium nitride through international conferences and scientific publications: it suddenly became clear that if what was shown there is true, then the relevance for us and our customers is particularly high. And it could be the key to high frequency filters for the next generation of mobile communication devices.

In this year's annual report, the focus lies on the highlights of the Institute; what was a particularly successful development in recent years which is already being applied?

The development of our quantum cascade lasers was very successful: scientifically enormously challenging, basic research was done, and then we made it far enough that we can now analyze chemical fingerprints by illuminating them with quantum cascade lasers. And this within barely four years. For me, this was a model development and marketing of applied research for German industrial companies.



Herr Ambacher, Sie sind seit 2007 Institutsleiter, was sind die ersten drei Worte, die Ihnen heute in den Sinn kommen, wenn Sie an das Fraunhofer IAF denken?

Exzellenz in der Forschung, Verbindungshalbleiter und wissenschaftliche Kreativität.

Und was genau entsteht aus dieser Kombination?

Kristallschichten aus unterschiedlichen, verbundenen Atomen – die beste Schmierseife für Elektronen, die man sich vorstellen kann. Daraus entsteht enorm leistungsstarke Elektronik und besonders effiziente Optoelektronik, die wiederum ihre Anwendung beispielsweise im Mobilfunk oder in der chemischen Analytik finden.

Auch wenn Silizium der am weitesten verbreitete Halbleiter ist, ist das Fraunhofer IAF nicht die einzige Institution, die an den vielversprechenden III/V-Halbleitern forscht. Was zeichnet das Fraunhofer IAF dabei vor allen anderen aus?

Wir sind die Einzigen in Europa, die von der Forschung im Bereich der Verbindungshalbleiter bis hin zum funktionierenden Gerät arbeiten. Wir entwickeln ausgehend von der Material- und Technologieentwicklung ein Produkt, das man auf den Tisch stellen und anschalten kann – und es funktioniert.

Was ja auch dem Profil von Fraunhofer, als Organisation für angewandte Forschung, entspricht. Kommt daher auch der Trend zum System?

Als Fraunhofer-Institut vereinen wir fundierte Forschung und unternehmerisches Handeln – wir stehen sozusagen zwischen Universität und Unternehmen. Das heißt, wir haben Doktoranden, die neue Themen erforschen, aber auch Entwickler und Ingenieure, die Systeme bauen. Damit schlagen wir die Brücke zwischen Wissenschaft und Anwendung. Erst die Erträge aus den Systemen erlauben uns auf lange Sicht auch wieder in neue Themen und in die Materialforschung zu investieren.

Was macht ein System – abgesehen von einer innovativen Technologie – denn erfolgreich?
Man muss frühzeitig den richtigen Trend erkennen. Denn vom Wissen, dass der Bedarf da ist, bis hin zum Einsatz dauert es oft mehrere Jahre. Die Wahrscheinlichkeit aber, dass wir einen Kunden für uns gewinnen können, steigt mit der Schnelligkeit, mit der wir eine Lösung anbieten können. Deshalb müssen wir mit der Entwicklung der Systeme in Vorleistung gehen.

And what will be the next important topic?

We are very diverse in the markets we address. But in my view, everything we develop in energy efficient microelectronics – where functionality and use can be increased – will find buyers. For instance, look at mobile communication: if you add up the amount of energy of 70,000 mobile stations in Germany, it is so much that the environmental damage we cause by CO₂ emission is so high that we necessarily have to do something. In addition, the high energy consumption causes large operational costs, which we have to cover by telephone charges. But even if we are able to pay the bill, we cannot tolerate 320,000 tons of CO₂ emissions each year into our environment caused by telephone calls.

Energy efficiency is an important objective of the Institute; what is your goal as the director of the Institute?

Above all, to keep the Institute fit for the future, that is, to reconcile finances and science, so that we have a positive development in both areas. To do this, we need to open up new markets and opportunities, recognize where the industrial interest lies and respond to it. In recent years, we have been very successful in the area of high frequency electronics and laser technology; next year we are expecting to proceed with assembly and packaging technology for infrared cameras as well as materials such as diamond or graphene.

And your personal goal for next year?

To connect the many good ideas with contracts – while still having enough time for the people at the Institute, to motivate and inspire new topics.

Oliver Ambacher

Wie findet man solche Trends?

Dieses Jahr sind wir über internationale Konferenzen und wissenschaftliche Publikationen auf das Material Aluminium-Scandium-Nitrid aufmerksam geworden: Plötzlich war klar, wenn das stimmt, was da gezeigt wird, dann ist die Relevanz für uns und unsere Kunden besonders hoch. Und es könnte der Schlüssel zu Hochfrequenzfiltern für die nächste Generation von Mobilfunkgeräten sein.

In diesem Jahr stehen im Jahresbericht die Highlights des Instituts im Fokus. Was war denn eine besonders erfolgreiche Entwicklung, die es bereits in die Anwendung geschafft hat?

Sehr erfolgreich lief die Entwicklung unserer Quantenkaskadenlaser: wissenschaftlich enorm anspruchsvoll, die Grundlagenforschung war getan, und dann haben wir es in knapp vier Jahren so weit geschafft, dass wir heute chemische Fingerabdrücke mit den Quantenkaskadenlasern analysieren können. Das war für mich eine vorbildliche Entwicklung und Vermarktung anwendungsbezogener Forschung in deutsche Industrieunternehmen.

Und was wird das nächste Highlight?

Wir sind sehr divers in den Märkten, die wir adressieren. Meiner Ansicht nach wird alles, was wir im Bereich energieeffizienter Mikroelektronik entwickeln – wo sich Funktionalität und die Nutzung steigern lassen – Abnehmer finden. Sehen Sie sich zum Beispiel den Mobilfunk an: Wenn man die Energiemengen der 70.000 Mobilfunkstationen in Deutschland zusammenzählt, ist das derart viel, dass der damit verbundene CO₂-Ausstoß, den wir durch Telefonieren erzeugen, so hoch wird, dass wir für zukünftige Kommunikationstechniken unbedingt was tun müssen. Auch führt der hohe Energieverbrauch zu großen Betriebskosten, die wir durch unsere Gebühren zahlen müssen. Aber selbst wenn wir die Kosten tragen können, dürfen wir unsere Atmosphäre nicht mit zusätzlichen 320.000 Tonnen CO₂ pro Jahr durch Telefonieren belasten.

Energieeffizienz als ein wichtiges Ziel des Instituts; was ist denn Ihr Ziel als Institutsleiter?

Allem voran das Institut zukunfts-fähig zu halten, das heißt, die Finanzen und die Wissenschaft in Einklang zu bringen, so dass wir in beiden Bereichen eine positive Entwicklung haben. Dazu müssen wir neue Märkte und Potenziale erschließen. Erkennen, wo das industrielle Interesse liegt und darauf reagieren. In den letzten Jahren ist uns das im Bereich der Hochfrequenz-elektronik und der Lasertechnologie bereits sehr gut gelungen; im nächsten Jahr soll es mit der Verbindungs- und Aufbautechnik für Infrarot-Kameras sowie mit Materialien wie Diamant oder Graphen weitergehen.

Und Ihr persönliches Ziel für das nächste Jahr?

Die vielen guten Ideen zu Aufträgen zu bringen – und dabei dennoch genug Zeit für die Menschen am Institut zu haben, zu motivieren und für neue Themen zu begeistern.

TABLE OF CONTENTS

IN THE LIMELIGHT

- 8 ADVISORY BOARD**
KURATORIUM
- 10 INSTITUTE IN FIGURES**
INSTITUT IN ZAHLEN
- 12 FIND SUCCESS AS A COMPANY WITH FRAUNHOFER IAF**
ALS UNTERNEHMEN MIT DEM FRAUNHOFER IAF
ERFOLGREICH SEIN
- 14 IMPULSES FOR GALLIUM NITRIDE IN**
EUROPE: OUR COOPERATION WITH INFINEON
IMPULSE FÜR GALLIUMNITRID IN EUROPA:
UNSERE KOOPERATION MIT INFINEON
- 16 QUANTUM CASCADE LASERS TAKE OFF:**
OUR COOPERATION WITH DIEHL
QUANTENKASKADENLASER HEBEN AB:
UNSERE KOOPERATION MIT DIEHL
- 18 DIALOG – SHINING LIGHT ON IAF**
GESPRÄCH – DAS IAF KURZ BELEUCHTET

INHALTSVERZEICHNIS

SPOT ON – BUSINESS UNITS

24 HIGH FREQUENCY ELECTRONICS
HOCHFREQUENZELEKTRONIK

40 POWER ELECTRONICS
LEISTUNGSELEKTRONIK

56 PHOTODETECTORS
PHOTODETEKTOREN

72 SEMICONDUCTOR LASERS
HALBLEITERLASER

88 SEMICONDUCTOR SENSORS
HALBLEITERSENSOREN

HIGHLIGHTS 2014

106 SHEDDING LIGHT ON PROCESSES – INITIALIZING IMPROVEMENTS
PROZESSE BELEUCHTEN – VERBESSERUNGEN INITIIEREN

108 CAREER: GRANTS FOR TOP FEMALE RESEARCHERS
KARRIERE: FÖRDERUNG FÜR TOP-WISSENSCHAFTLERINNEN

110 REACH – KEEPING AN EYE ON HAZARDOUS SUBSTANCES
REACH – GEFAHRSTOFFE IMMER IM BLICK

112 MODERN EQUIPMENT FOR EXCELLENT SCIENCE
MODERNE AUSSTATTUNG FÜR EXZELLENTE WISSENSCHAFT

116 FAIRS AND EVENTS 2014
MESSEN UND VERANSTALTUNGEN 2014

120 APPENDIX
ANHANG

ADVISORY BOARD

KURATORIUM

Experts from industry, universities, and the Federal Ministries evaluate the research program of the institute, 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

Dr. Klaus Heyers

Robert Bosch GmbH, Reutlingen

Prof. Dr. Rik Jos

NXP Semiconductors Netherlands B. V., Nijmegen

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

Prof. Dr. Jürg Leuthold

ETH Zürich

Dr. Conrad Reynvaan

Hoffmann & Co. Elektrokohle AG, Bad Goisern



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.

BDir Wolfgang Scheidler

European Defence Agency (EDA), Bruxelles

Dr. Dietmar Schill

Sony Deutschland GmbH, Stuttgart

TRDir Uwe Senkbeil

Wehrtechnische Dienststelle für
Informationstechnologie und Elektronik WTD 81, Greding

Dr. Arno Simon

Bruker Optik GmbH, Ettlingen

Dr. Klaus Streubel

OSRAM GmbH, Augsburg

TRDir Ralf Uekermann

Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und
Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw), Koblenz

MinR Norbert Weber

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn

Prof. Dr. Werner Wiesbeck

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

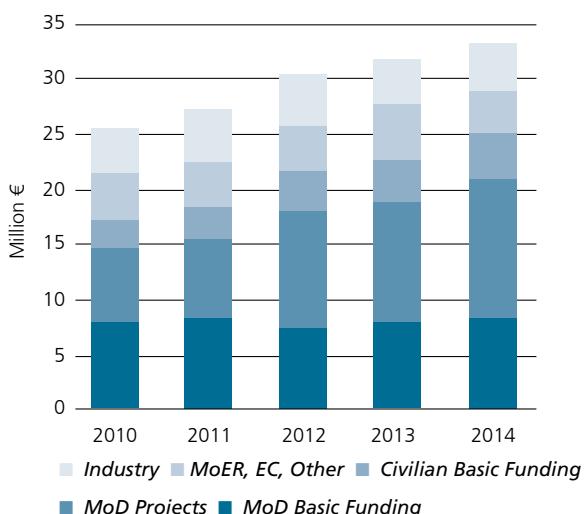
INSTITUTE IN FIGURES

BEATRIX SCHWITALLA

TEL. +49 761 5159-414

BEATRIX.SCHWITALLA@IAF.FRAUNHOFER.DE

In 2014, Fraunhofer IAF once again experienced a continuous growth: the operating budget reached a volume of 24.7 million €, which denotes a slight increase compared to the previous year. Personnel cost rose to 14.3 million €, while administrative expenses sank significantly to 10.4 million €. The increase in personnel cost results from a growing number of staff that is employed under the terms of the collective agreement as well as the new pay scale in public services. In the administrative costs, material cost and external R&D cost sank in particular. The 8.2 million € which were invested in equipment and facilities represent a new record. Here, some of the biggest investments were a multi-wafer metal organic chemical vapor deposition system (MOCVD) for the epitaxy of AlGaN heterostructures used in UV detectors, whose purchase was supported by project funding from the Federal Ministry of Defense (BMVg) and amounted to 3 million €, as well as a new 1 million € facility for the flip-chip assembly of infrared-focal-plane-arrays. A strategic investment of the Fraunhofer-Gesellschaft was a CNC machine in order to further increase skills in mounting and packaging technology. Thus results with 33 million € a new high for the overall budget. This marks a new high and represents a total increase of 4.3 %.

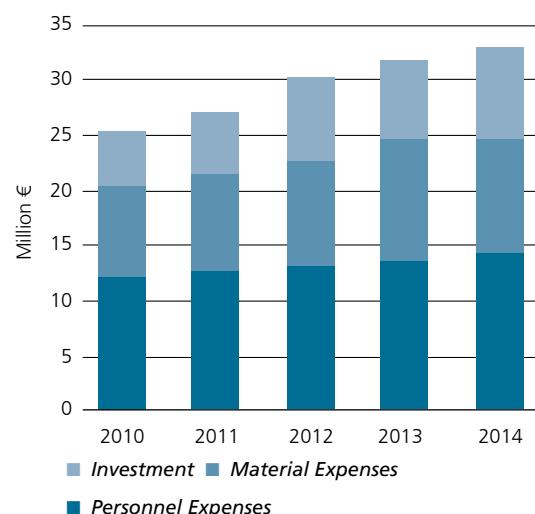


1 Total Budget Financing

Finanzierung Gesamthaushalt

The largest part of the operating budget and investments in 2014 was financed by the Federal Ministry of Defense (BMVg), with a share of about 63 %. Fortunately, efforts to raise funds in industrial and license revenues were successful. Therefore, industrial revenues rose from 4.1 to 4.3 million €, resulting in a 42.2 % share of civil research activities. Projects in the field of security and defense showed an even higher increase, whereas national public project funding decreased. The overall budget continues to be well funded, so that a positive operative result was achieved in 2014 despite the use of institute reserves for strategic investments and minor building projects.

While the number of full-time equivalent employees rose in 2014, the absolute number of staff decreased to 265 employees for the first time. As a result of changes in personnel and training processes some positions were temporarily staffed twice, so that savings were made by a lower number of student assistants. It is gratifying to see that the share of women working at Fraunhofer IAF rose to 35 %. Of the 265 employees, 178 work directly in research, and 87 in administration and technical services.



2 Total Budget Expenses

Ausgaben Gesamthaushalt

INSTITUT IN ZAHLEN

Im Jahr 2014 zeigte das Fraunhofer IAF ein beständiges Wachstum: Der Betriebshaushalt erreichte ein Volumen von 24,7 Mio. €, was eine knappe Steigerung gegenüber dem Vorjahr bedeutet. Dabei stiegen die Personalaufwendungen auf 14,3 Mio. €, die Sachaufwendungen sanken dagegen signifikant auf 10,4 Mio. €. Der Anstieg bei den Personalkosten resultierte aus der Zunahme der tariflich beschäftigten Mitarbeiter sowie dem neuen Tarif im öffentlichen Dienst. Bei den Sachaufwendungen ist insbesondere der Aufwand für Material sowie für fremde FuE-Leistungen zurückgegangen. Ein neuer Rekord sind die 8,2 Mio. € für Investitionen in Geräte und Anlagen. Hierbei waren die größten Anschaffungen eine Multiwafer-MOCVD-Anlage für die Epitaxie von AlGaN-Heterostrukturen für Anwendung in UV-Detektoren in Höhe von ca. 3 Mio. €, projektfinanziert durch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), sowie eine neue Anlage zur Flip-Chip-Montage von Infrarot-Focal-Plane-Arrays in Höhe von ca. 1 Mio. €. Ebenfalls der Stärkung der Fähigkeiten in der Aufbau- und Verbindungstechnik diente der Kauf einer CNC-Maschine, eine strategische Investition der Fraunhofer-Gesellschaft. Somit ergibt sich für 2014 mit 33 Mio. € ein neuer Höchststand des Gesamthaushalts. Das entspricht einem Gesamtwachstum von knapp 4,3 %.

Mit einem Anteil von etwa 63 % wurde der größte Teil des Betriebshaushalts und der Investitionen 2014 vom BMVg finanziert. Erfreulicherweise haben die Anstrengungen in der Einwerbung von Industrie- und Lizenzierlösen Erfolge gezeigt. Die Industrieerlöse sind absolut von 4,1 auf 4,3 Mio. € gewachsen, was einem Anteil von ca. 42,2 % an den zivilen Forschungsaktivitäten entspricht. Einen noch höheren Zuwachs gab es bei den Projekten im Bereich der Verteidigung und Sicherheit, während bei der nationalen öffentlichen Projektförderung ein Rückgang zu verzeichnen war. Der Gesamthaushalt zeigte sich weiterhin als sehr gut finanziert, so dass auch 2014 trotz des Einsatzes von Institutsreserven für strategische Investitionen und kleinere Baumaßnahmen wieder ein positives Institutsergebnis erzielt werden konnte.

Während die Zahl der Vollzeit-äquivalenten Beschäftigten 2014 zunahm, gab es bei der absoluten Zahl der Beschäftigten erstmals einen Rückgang auf 265 Mitarbeiter. Bei den Stammkräften waren aufgrund von Personalwechsel und Einarbeitungsprozessen Positionen temporär mehrfach besetzt, so dass Einsparungen durch eine geringere Anzahl von studentischen Hilfskräften erfolgten. Erfreulich ist der auf 35 % gestiegene Anteil der weiblichen Beschäftigten. Von den 265 Beschäftigten sind 178 Mitarbeiter direkt in der Forschung und 87 Mitarbeiter in der Administration und den technischen Diensten des Fraunhofer IAF tätig.

FIND SUCCESS AS A COMPANY WITH FRAUNHOFER IAF

MARTIN WALTHER

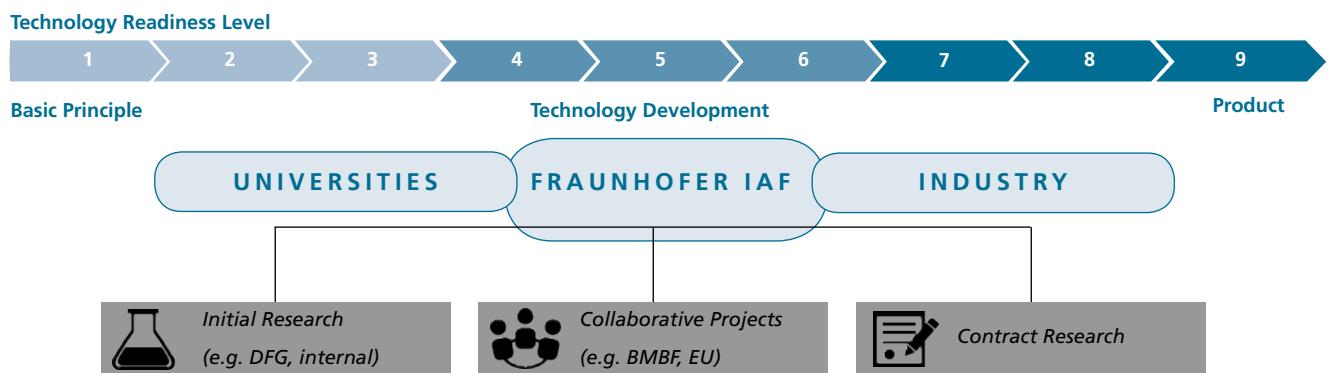
TEL. +49 761 5159-434

MARTIN.WALTHER@IAF.FRAUNHOFER.DE

Developing products with foresight and always being one step ahead of the competition – that is the only way companies can survive in the competitive market for semiconductor technologies. The European semiconductor industry must not only be at the forefront from a technological perspective in order to succeed under the pressure of fierce competition from Asia, but must also bring attractively priced products to the market. However, research and development are expensive – so what can be done? With its applied research and development in the area of III-V semiconductors as an alternative to silicon, Fraunhofer IAF offers businesses different forms of cooperation (Fig. 1). For example, we research on behalf of industry partners and – depending on the issue – are even in a position to provide electronic and optoelectronic components and systems within a few months. In almost all publicly funded projects, we cooperate with companies – not only with cor-

porations, smaller businesses are also well represented in our industry contacts. In addition, we conduct preliminary research on topics that we consider to be particularly promising. This gives companies the opportunity to access these technologies using licenses later on.

Fraunhofer IAF bridges the gap between basic research and product development. Thus, it offers support for companies in the development of new and innovative products based on micro and nanotechnologies and compound semiconductors. We accompany companies from the concept and planning through the development to a concrete result. Our core competences (Fig. 2), which are based on years of experience, enable application-oriented research and development for a variety of industries, be it IT and communications technology, medicine, security, energy or process and material control.



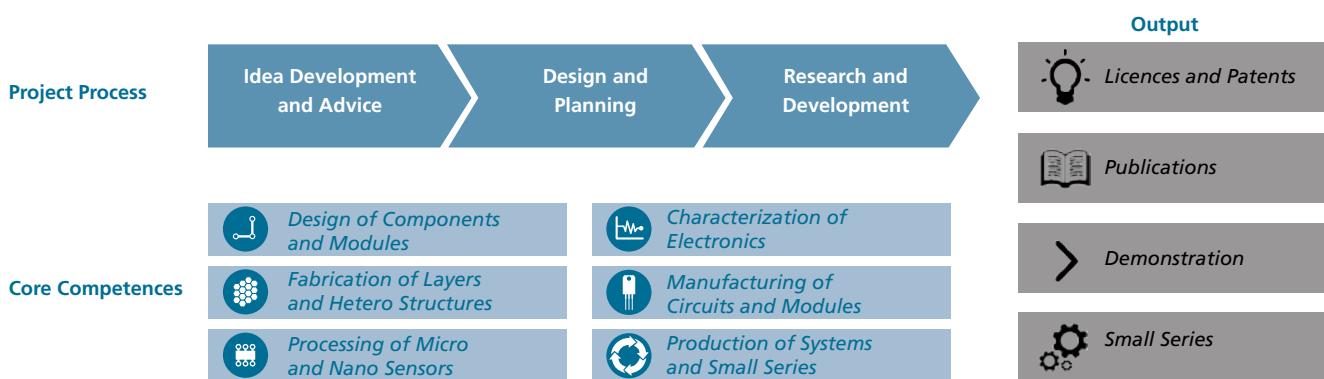
1 Fraunhofer IAF bridges the gap between basic research and product development.

Das Fraunhofer IAF schlägt die Brücke zwischen Grundlagenforschung und Produktentwicklung.

ALS UNTERNEHMEN MIT DEM FRAUNHOFER IAF ERFOLGREICH SEIN

Zukunftsfähige Produkte entwickeln und dem Wettbewerb stets ein Stück voraus sein – nur so können Unternehmen auf dem umkämpften Markt für Halbleitertechnologien bestehen. Die europäische Halbleiterindustrie muss nicht nur aus technologischer Perspektive ganz vorne mit dabei sein, um unter dem Druck der harten Konkurrenz aus Asien erfolgreich zu sein, sondern auch preislich attraktive Produkte auf den Markt bringen. Doch Forschung und Entwicklung sind teuer – was tun? Mit seiner anwendungsnahen Forschung und Entwicklung im Bereich der III/V-Halbleiter, als Alternative zu Silizium, bietet das Fraunhofer IAF Unternehmen verschiedene Möglichkeiten der Zusammenarbeit (Abb. 1). So forschen wir im Auftrag von Industriepartnern und sind – je nach Fragestellung – auch in der Lage binnen weniger Monate elektronische und optoelektronische Komponenten und Systeme zu liefern. In fast allen öffentlich geförderten Projekten arbeiten wir mit Unternehmen zusammen – nicht nur mit Konzernen, sondern auch der Mittelstand ist hier stark vertreten. Darüber hinaus betreiben wir Vorlaufforschung zu Themen, die wir als besonders vielversprechend erachten. Dabei besteht für Unternehmen die Möglichkeit über Lizenzen später auf diese Technologien zugreifen zu können.

Das Fraunhofer IAF schlägt die Brücke zwischen Grundlagenforschung und Produktentwicklung. Für Unternehmen bietet es damit eine Stütze in der Entwicklung neuer und innovativer Produkte, die auf Mikro- und Nanotechnologien sowie Verbindungshalbleitern basieren. Wir begleiten Unternehmen von der Idee und Planung über die Entwicklung bis hin zum konkreten Ergebnis. Unsere Kernkompetenzen (Abb. 2), die auf langjährigen Erfahrungen beruhen, ermöglichen die anwendungsnahen Forschung und Entwicklung für eine Vielzahl von Branchen, sei es IT- und Kommunikationstechnik, Medizin, Sicherheit, Energie oder Prozess- und Werkstoffkontrolle.



2 The core competences of Fraunhofer IAF form the base for cutting-edge technologies.

Die Kernkompetenzen des Fraunhofer IAF sind Grundlage für wegbereitende Technologien.

IMPULSES FOR GALLIUM NITRIDE IN EUROPE: OUR COOPERATION WITH INFINEON

IMPULSE FÜR GALLIUMNITRID IN EUROPÄ: UNSERE KOOPERATION MIT INFINEON

Whether in household appliances, electric cars, solar systems or in the communications technology of a space satellite – electronic components on the basis of the semiconductor gallium nitride (GaN) may show very high performance in many applications in future, while saving energy. First gallium nitride components are already commercially available. Even though the power semiconductor has not yet penetrated the mass market, market forecasts are promising: according to Yole Développement, an annual market volume of 600 million US dollars will be achieved with gallium nitride power electronics in 2020 alone. Research institutions and companies all over the world are working on mastering challenges in the epitaxy of the semiconductor material.

As soon as 2009, Infineon and Fraunhofer IAF started a project together on the research and development of gallium nitride – one of the first points of contact of the company with the promising semiconductor material. Evaluating gallium nitride on silicon carbide as a substrate for epitaxial growth was the target of the project with a running time of 18 months. In 2010, Infineon directly commissioned the successor project to develop a voltage converter based on gallium nitride. This time, gallium nitride was to be grown on silicon – a big

challenge for the epitaxy and technology development of the institute. For this purpose, especially electrically isolating gallium nitride layers need to be grown epitaxially and contact materials that are compatible with silicon technology need to be developed.

In 2014, a gallium nitride transistor with a blocking voltage capability of more than 600 volts was presented – a milestone in the development of gallium nitride technology in Europe. The transistor is not yet ready for mass production: performance and reliability must be increased and the defect density reduced, so that it can one day help to permanently reduce acquisition and operation costs in a variety of systems.

»For Infineon, the cooperation with Fraunhofer IAF was the basis for a fast entry into the development of GaN power semiconductors. Essential technological know-how was developed and efficiently transferred to Infineon. During the process, IAF made, among others, many valuable contributions to the development of a high-voltage GaN epitaxy on silicon wafers.« (Dr. Thomas Detzel, Senior Manager GaN Technology Development, Infineon Technologies Austria AG, Villach)

**First common project for evaluating
GaN on SiC substrates**
Erstes gemeinsames Projekt zur
Evaluierung von GaN auf SiC-Substraten

**Development of a GaN transistor
with high output power**
Entwicklung eines GaN-Transistors
mit hoher Ausgangsleistung



Sei es in Haushaltsgeräten, Elektroautos, Solaranlagen oder in der Kommunikationstechnik eines Weltraum-Satelliten – elektronische Bauteile auf Basis des Halbleiters Galliumnitrid (GaN) können zukünftig in vielen Anwendungen sehr hohe Leistungen schalten und gleichzeitig Energie sparen. Erste GaN-Bauteile sind bereits kommerziell erhältlich. Auch wenn der Leistungshalbleiter den Massenmarkt noch nicht durchdrungen hat, sind die Marktprognosen vielversprechend: 2020 wird laut Yole Développement allein mit GaN-Leistungselektronik ein jährliches Marktvolumen von 600 Mio. US-Dollar erreicht. Forschungseinrichtungen und Unternehmen weltweit arbeiten daran, die technologischen Herausforderungen des Halbleitermaterials zu meistern.

Bereits 2009 starteten Infineon und das Fraunhofer IAF gemeinsam ein Projekt zur Erforschung und Weiterentwicklung von Galliumnitrid – einer der ersten Kontaktpunkte des Unternehmens mit dem vielversprechenden Halbleitermaterial. Galliumnitrid auf Siliziumcarbid als Substrat zu evaluieren, war das Ziel des über 18 Monate laufenden Projekts. 2010 beauftragte Infineon direkt das Nachfolgeprojekt zur Entwicklung eines Spannungswandlers auf Basis von Galliumnitrid. Diesmal sollte Galliumnitrid auf Silizium gewachsen werden – eine große Herausforderung für die Epitaxie- und Technologieentwicklung des Instituts. Hierfür müssen elektrisch besonders gut isolierende Galliumnitrid-Schichten epitaxiert und Kontaktmaterialien entwickelt werden, die kompatibel mit der Siliziumtechnologie sind.

2014 konnte ein Galliumnitrid-Transistor mit einer Sperrspannung von mehr als 600 Volt präsentiert werden – ein Meilenstein in der Weiterentwicklung der Galliumnitrid-Technologie in Europa. Noch ist der Transistor nicht serienreif: Leistung und Lebensdauer müssen weiter erhöht und die Defektdichte reduziert werden, damit er eines Tages dazu beitragen kann, in einer Vielzahl von Systemen die Anschaffungs- und Betriebskosten dauerhaft zu senken.

»Für Infineon war die Kooperation mit Fraunhofer IAF die Basis für einen schnellen Einstieg in die Entwicklung von GaN-Leistungshalbleitern. Wesentliches Technologie-Know-How wurde erarbeitet und effizient zu Infineon transferiert. Das IAF leistete dabei unter anderem wertvolle Beiträge zur Entwicklung einer spannungsfesten GaN-Epitaxie auf Siliziumwafeln.«



*Dr. Thomas Detzel, Senior Manager GaN Technology Development,
Infineon Technologies Austria AG, Villach*

**GaN-on-Si transistor with
a blocking voltage of > 600 Volt**
GaN-auf-Si-Transistor mit einer
Sperrspannung von > 600 Volt

**Increase of performance and
reliability of GaN devices**
Erhöhung der Leistung und Lebens-
dauer von GaN-Bauelementen

QUANTUM CASCADE LASERS TAKE OFF: OUR COOPERATION WITH DIEHL

QUANTENKASKADENLASER HEBEN AB: UNSERE KOOPERATION MIT DIEHL

Identifying and immediately assessing hazards in order to be able to react within seconds: laser systems help to protect aircrafts or to detect explosives. Due to their high spectral brilliance and large tuning range, quantum cascade lasers are particularly suitable for infrared-optical countermeasures and for the detection of hazardous materials.

Fraunhofer IAF and Diehl BGT Defence have been working together since 2006 in the field of infrared semiconductor lasers and their application in defense and security. The first contact was made during an internal Fraunhofer project on the development of laser-based techniques for the detection of explosives in which Diehl BGT Defence was involved as industrial advisor. In 2007, a direct bilateral research contract with Diehl followed under which Fraunhofer IAF developed application-specific infrared laser modules within 12 months. In the course of further publicly funded projects and direct orders from Diehl, the development of sensors for security applications by means of quantum cascade lasers was

steadily pursued – thus further expanding the cooperation. This collaboration established the basis for new, innovative products. Meanwhile, infrared laser technology has matured so that it can be used in aircraft self-protection systems against heat-seeking missiles.

But quantum cascade lasers can not only be used to protect aircrafts. Together with Diehl, Fraunhofer IAF is developing quantum cascade laser-based hyperspectral active infrared imaging systems for e. g., the stand-off detection of hazardous chemicals. There is one clear common objective: only by establishing a product portfolio with quantum cascade lasers can the use of quantum cascade lasers for protection and sensing be advanced.

»Regarding the cooperation with Fraunhofer IAF, I especially appreciate the long-term, system-oriented research focus. In the early stages of the cooperation, Diehl and IAF developed a common objective which we pursue with technical expertise and personal commitment on both sides.« (Dr. Hans Dieter Tholl, Head Optics and Laser Techniques, Diehl)

First contact in the context of a Fraunhofer project for explosives detection with infrared lasers
Erster Kontakt im Rahmen eines Fraunhofer-Projekts zur Explosivstoffdetektion mit Infrarot-Lasern

First direct order from Diehl for the development of laser modules
Erster Direktauftrag von Diehl zur Entwicklung von Lasermodulen



Gefahren erkennen und sofort evaluieren, um sekundenschnell reagieren zu können: Lasersysteme helfen Flugzeuge zu schützen oder Explosivstoffe zu detektieren. Aufgrund ihrer hohen spektralen Brillanz und ihrem großen Durchstimbereich sind Quantenkaskadenlaser für Infrarot-optische Gegenmaßnahmen und zur Detektion von Gefahrstoffen besonders gut geeignet.

Seit 2006 arbeiten das Fraunhofer IAF und Diehl BGT Defence auf dem Gebiet der Infrarot-Halbleiterlaser und deren Anwendung in der Verteidigungs- und Sicherheitstechnik zusammen.

Der erste Kontakt kam während eines Fraunhofer-internen Projekts zur Erforschung von Lasertechnik zur Explosivstoffdetektion zustande, in dem Diehl BGT Defence als industrieller Berater eingebunden war. 2007 folgte ein

Direktauftrag von Diehl, in dessen Rahmen das Fraunhofer IAF innerhalb von 12 Monaten einsatzbereite Infrarot-Lasermodule entwickelte.

Im Zuge weiterer öffentlich geförderter Projekte und Direktaufträge von Diehl wurde die Sicherheitssensorik mittels Quantenkaskadenlaser stetig vorangetrieben – und damit die Kooperation weiter ausgebaut. Aus dieser Zusammenarbeit entstand die Grundlage für neue, innovative Produkte. Mittlerweile ist die Infrarot-Lasertechnologie so weit ausgereift, dass sie in Flugzeug-Schutzsystemen zur Abwehr von Lenkflugkörpern eingesetzt werden kann.

»In der Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAF schätze ich besonders die langfristige, systemorientierte Ausrichtung der Forschung. In der Frühphase der Kooperation haben Diehl und IAF eine gemeinsame Zielsetzung erarbeitet, die wir mit beidseitiger technischer Kompetenz und persönlichem Engagement verfolgen.«

Dr. Hans Dieter Tholl, Head Optics and Laser Techniques, Diehl



Operational status of quantum cascade lasers for the protection of aircrafts

Anwendungsreife der Quantenkaskadenlaser zum Schutz von Flugzeugen

Development of laser technology for new applications in security, medicine and quality control

Weiterentwicklung der Lasertechnik für neue Anwendungen in Sicherheit, Medizin und Qualitätskontrolle

DIALOG – SHINING LIGHT ON IAF

GESPRÄCH – DAS IAF KURZ BELEUCHTET

Mr. Wagner, you have now spent 30 years at Fraunhofer IAF; Mr. Walther, you came to the institute in 1996. What was your motivation for joining Fraunhofer?

Wagner: After completing my doctoral thesis, I spent three years at the Max Planck Institute for Solid State Research. During my work there, I came to the conclusion that I do not want to do research just for the sake of gaining knowledge. I was fascinated by the mixture of research and application at Fraunhofer.

Walther: I think this is exactly what characterizes Fraunhofer, that we work between industrial research and academic fundamental research – and that it is possible to switch back and forth.

Wagner: Furthermore, I found it exciting that the research fields at Fraunhofer are mainly defined within the institutes. This kind of participation in thematic decision-making can rarely be found in other research institutions or in industrial research.

You can both look back upon a long time at Fraunhofer IAF. What has actually changed the most since you came to the institute?

Wagner: In my early days, the work here at the institute used to be very similar to that at universities, it was primarily knowledge-driven. In the 90s, it became our main task to develop technologies and processes and to transfer them to partners from the semiconductor industry. Today, our classical technology-oriented customers have become fewer. We increasingly work with customers who aren't actually involved with our components or, for example, infrared-physics. Instead, they address us with problems they cannot solve in a conventional way and we develop customized solutions – sometimes also in co-operation with other Fraunhofer Institutes.

Walther: Therefore, we successively expanded IAF's portfolio. We now offer a very large spectrum based on III-V semiconductors and diamond: from material science and process technology issues to the optimization of devices and components to customized system solutions.



»In my experience, to generate new ideas one has to work on a certain subject for some time, combined with creative experiments. Expertise in various areas and scientists who interact across borders of their business units, this is what really creates something exciting and new.«

Joachim Wagner, who already dealt with lasers and the physics of semiconductors since his doctorate in 1982 and now heads the business unit »Semiconductor Lasers«.

Where do you hence see the future hot topics for the institute?

Walther: Since the III-V semiconductors are tending to saturation based on technology, I see the main potential for the future in the extension of the value chain. This means, for example, in the field of lasers and detectors that we can provide powerful and customized systems for spectroscopic applications by optimizing the components, or infrared detectors with high spatial and thermal resolution. In high frequency electronics, the aim is to further advance circuits and technologies for radar or terahertz systems. In the field of power electronics, the topic of energy efficiency in the process of converting electrical energy is one of the major issues of the future which IAF has already successfully faced in recent years.



Herr Wagner, Sie selbst sind in diesem Jahr 30 Jahre am Fraunhofer IAF, Herr Walther, Sie sind 1996 ans Institut gekommen, was waren denn ihre Beweggründe zu Fraunhofer zu gehen?

Wagner: Nach der Promotion war ich drei Jahre am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung. Dabei wurde mir klar, dass ich nicht auf Dauer rein um der Erkenntnis Willen forschen möchte. Mich hat die Mischung aus Forschung und Anwendung bei Fraunhofer fasziniert.

Walther: Ich denke, das ist gerade der Punkt, der Fraunhofer ausmacht, dass man zwischen industrieller Forschung und akademischer grundlagenorientierter Forschung tätig sein kann – und man zwischen diesen beiden Seiten auch immer wieder hin und her wechseln kann.

Wagner: Außerdem fand ich es spannend, dass die Forschungsthemen bei Fraunhofer weitgehend innerhalb der Institute definiert werden. Diese Form der inhaltlichen Mitbestimmung hat man in anderen Forschungseinrichtungen oder auch der industriellen Forschung und Entwicklung sehr viel weniger.

Eine lange Zeit, auf die Sie beide am Fraunhofer IAF zurück schauen können – was hat sich denn am meisten verändert seit Sie ans Institut gekommen sind?

Wagner: Früher wurde hier noch sehr universitätsähnlich gearbeitet, eigentlich primär erkenntnisgetrieben. In den 90er-Jahren war es dann eine der Hauptaufgaben, Technologien und Prozesse zu entwickeln und diese an Industriepartner aus der Halbleiterbranche zu transferieren. Heute werden klassische Technologiekunden weniger und wir haben zunehmend Kunden, die sich gar nicht selbst mit den Details unserer Bauelemente oder beispielsweise der Infrarot-Physik beschäftigen. Stattdessen kommen sie mit einem Problem, das sie konventionell nicht lösen können – und wir erarbeiten dann, eventuell auch gemeinsam mit anderen Fraunhofer-Instituten, eine Lösung.

Walther: Das Portfolio des IAF hat sich dadurch nach und nach erweitert. Wir bieten heute basierend auf III/V-Halbleitern und Diamant ein sehr großes Spektrum an: von materialwissenschaftlichen Arbeiten über die Bearbeitung technologischer Fragestellungen, zur Optimierung von Bauelementen und Komponenten bis hin zu kundenspezifischen Systemlösungen.

Wo sehen Sie demnach die zukünftigen Top-Themen des Instituts?

Walther: Da die III/V-Halbleiter auf technologischer Basis in die Sättigung kommen, sehe ich das Hauptpotenzial zukünftig in der Verlängerung der Wertschöpfungskette. Das heißt zum Beispiel im Bereich der Laser und Detektoren, dass wir durch Optimierung der Bauelemente leistungsstarke und maßgeschneiderte Systeme für spektroskopische Anwendungen bereitstellen können, oder auch Infrarot-Detektoren hoher räumlicher wie thermischer Auflösung. In der Hochfrequenzelektronik geht es darum, Schaltungen und Technologien für Radare oder Terahertz-Systeme weiter voranzutreiben; im Bereich der Leistungselektronik ist das Thema Energieeffizienz beim Wandeln elektrischer Energie eines der großen Zukunftsthemen, dem sich das Fraunhofer IAF in den letzten Jahren bereits erfolgreich gestellt hat.

Dr. Martin Walther (l.), head of the business unit »Photodetectors,« and Prof. Joachim Wagner (r.), who runs the business unit »Semiconductor Lasers« in conversation with Julia Roeder (Public Relations).

Dr. Martin Walther (li.), Leiter des Geschäftsfelds »Photodetektoren« und Prof. Joachim Wagner (re.), der das Geschäftsfeld »Halbleiterlaser« leitet, im Gespräch mit Julia Roeder (Öffentlichkeitsarbeit).

But isn't it also about transferring knowledge to the industry?

Wagner: It depends on the subject. Technologies will be transferred to the customer; system know-how is often developed together with customers. In many cases the task today is to deliver the results in the form of hardware. Particularly when only relatively small quantities are needed and no business model is available from industry to commercialize the technology. Here we step in and produce components or modules – key components that are not available elsewhere – in pilot manufacturing.

How do you experience this collaboration with so many different clients and partners?

Walther: I think it is precisely this wide spectrum in which we move – developments together with the industry, as a supplier or with scientific issues – what makes life as a Fraunhofer researcher so interesting. In general, there is very little routine.

Wagner: I can only confirm that, after 30 years at Fraunhofer IAF there was no day like any other. One has to always be tuned into the current topics, this does not only hold for the institute, but also for Fraunhofer as a whole. One has to use precisely this knowledge to engage with the customer and to find answers to his questions and solutions to his problems.

This way you constantly gain insight into new topics and areas.

How does one find the best solution, how does innovation work at Fraunhofer?

Wagner: In my experience, to generate new ideas one has to work on a certain subject for some time. Sometimes they also emerge from ongoing projects, when new solutions can suddenly be found. And not at least from creative experimenting: the white LED, for example, was never part of a strategic plan – but was the result of an intelligent »gimmick«. Expertise from various fields, scientists who interact across the borders of their business unit, that is what really creates something exciting and new.

And finally, what is your wish for the future?

Walther: Specifically for my business unit, the wider use of the technologies we developed. I am convinced that there is still a lot of potential to »make the invisible visible« in the spectral regions that are not accessible to the human eye.

Wagner: That the wealth of individual developments leads to new marketable products, and that I, for example, discover infrared lasers from Fraunhofer IAF protecting the plane on one of my next flights.

Aber geht es denn nicht auch darum das Wissen in die Industrie zu transferieren?

Wagner: Das hängt vom Thema ab. Bei den Technologien geht es darum diese zu transferieren, System-Know-How wird oftmals gemeinsam mit den Kunden entwickelt. In vielen Fällen sollen die Ergebnisse in Form von Hardware zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere dort, wo nur relativ geringe Stückzahlen benötigt werden und kein Geschäftsmodell seitens der Industrie vorhanden ist, um die Technologie zu kommerzialisieren. Hier springen wir ein und stellen im Rahmen von Pilotfertigungen Komponenten oder Module her – Schlüsselkomponenten, die sonst nicht erhältlich sind.

Wie erleben Sie diese Zusammenarbeit mit den unterschiedlichen Kunden und Partnern?

Walther: Ich denke gerade dieses breite Spektrum in dem man sich bewegt – Entwicklungen gemeinsam mit der Industrie, als Lieferant oder bei wissenschaftlichen Fragestellungen – macht das Leben als Fraunhofer-Forscher so interessant. Generell gibt es sehr wenig Routine.

Wagner: Das kann ich ebenfalls nur bestätigen, nach 30 Jahren Fraunhofer IAF war eigentlich kein Tag wie der andere. Es gilt immer an den aktuellen Themen dran zu bleiben, nicht nur im Institut, sondern auch bei Fraunhofer insgesamt und sich mit diesem Wissen auf die Fragen und Aufgaben des Kunden einzulassen, immer wieder neue Einsichten in verschiedenste Problematiken zu bekommen und dann gemeinsam Lösungen zu erarbeiten.

Wie findet man denn die beste Lösung, wie funktioniert Innovation bei Fraunhofer?

Wagner: Meiner Erfahrung nach, kommen die meisten guten Ideen aus der anhaltenden Beschäftigung mit der Materie. Oft auch aus laufenden Projekten heraus, in denen man plötzlich neue Lösungswege findet. Und, nicht zuletzt auch aus kreativem Ausprobieren: Die weiße LED zum Beispiel stand auf keinem Strategieplan – sondern war das Ergebnis einer intelligenten »Spielerei«. Verschiedene Expertisen, Wissenschaftler, die auch über die Geschäftsfeldgrenzen hinaus miteinander in Interaktion treten, daraus entsteht das wirklich Spannende.

Und zum Abschluss, was würden Sie sich für die Zukunft wünschen?

Walther: Konkret für mein Geschäftsfeld den breiteren Einsatz der bei uns entwickelten Technologien. Ich bin überzeugt, es ist noch viel Potenzial vorhanden das »nicht Sichtbare sichtbar zu machen«, in den Spektralbereichen, die für das menschliche Auge nicht zugänglich sind.

Wagner: Dass die Fülle der Einzelentwicklungen zu neuen marktfähigen Produkten führen, und ich zum Beispiel bei zukünftigen Fernreisen Infrarot-Laser des Fraunhofer IAF zum Schutz des Flugzeugs entdecke.

»Wir bieten heute basierend auf III/V-Halbleitern und Diamant ein sehr großes Spektrum an: von materialwissenschaftlichen Arbeiten über die Bearbeitung technologischer Fragestellungen, zur Optimierung von Bauelementen und Komponenten bis hin zu kundenspezifischen Systemlösungen.«



Martin Walther, der nach seiner Post-Doktoranden-Tätigkeit in der Industrie 1996 ans Fraunhofer IAF kam und heute das Geschäftsfeld »Photodetektoren« leitet.

SPOT ON – BUSINESS UNITS

24

HIGH FREQUENCY ELECTRONICS HOCHFREQUENZELEKTRONIK

- 26 Millimeter-waves Light up the Fog
Millimeterwellen lichten den Nebel
- 28 Millimeter-wave Imaging at 100 GHz
Bildgebung mit Millimeterwellen bei 100 GHz
- 32 Low-noise Amplifiers for Space
Rauscharme Verstärker für die Raumfahrt
- 36 Towards Terahertz Communication Systems
Auf dem Weg zu Terahertz-Kommunikationssystemen

40

POWER ELECTRONICS LEISTUNGSELEKTRONIK

- 42 Hot Spot: Mobile with Gigabits
Hot Spot: Mit Gigabits mobil unterwegs
- 44 Ka-Band Power Amplifiers based on Gallium Nitride
Ka-Band-Leistungsverstärker basierend auf Galliumnitrid
- 48 Fast and Efficient Power Switching with Gallium Nitride on Silicon
Schnelles und Effizientes Schalten durch Galliumnitrid auf Silizium
- 52 Reliability of Gallium Nitride HEMTs for High-frequency Applications
Zuverlässigkeit von Galliumnitrid-HEMTs für Hochfrequenz-Anwendungen

56

PHOTODETECTORS
PHOTODETEKTOREN

- 58 Focusing the Invisible
Das Unsichtbare im Fokus
- 60 Radiation-hard UV Detectors
Strahlungsbeständige UV-Detektoren
- 64 Limiting Mechanisms in InAs/GaSb Superlattice Infrared Photodiodes
Limitierende Mechanismen in InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodioden
- 68 Excess Noise in InAs/GaSb Superlattices
Zusatzstromrauschen von InAs/GaSb-Übergittern

72

SEMICONDUCTOR LASERS
HALBLEITERLASER

- 74 Bringing Light into the Dark with Laser Spectroscopy
Mit Laserspektroskopie Licht ins Dunkel bringen
- 76 Miniaturized External Cavity Quantum Cascade Lasers for Spectroscopy
Miniaturisierte Quantenkaskadenlaser für die Spektroskopie
- 80 Less Heat – More Power: 2 μ m Semiconductor Disk Laser
Weniger Wärme – mehr Leistung: 2- μ m-Halbleiter-Scheibenlaser
- 84 Energy-Efficient LED Lighting Based on Gallium Nitride
Energieeffiziente LED-Beleuchtung auf der Basis von Galliumnitrid

88

SEMICONDUCTOR SENSORS
HALBLEITERSENSOREN

- 90 Diamonds Glow with High Performance
Diamant glänzt mit Hochleistung
- 92 Diamond Lenses for High Power Lasers
Diamantlinsen für Hochleistungslaser
- 96 Diamond-based Resonators for High-frequency Applications
Diamant-basierte Resonatoren für Hochfrequenz-Anwendungen
- 100 Graphene – the Thinnest Material for Electrodes
Graphen – das dünste Elektroden-Material

HIGH FREQUENCY ELECTRONICS

MICHAEL SCHLECHTWEG

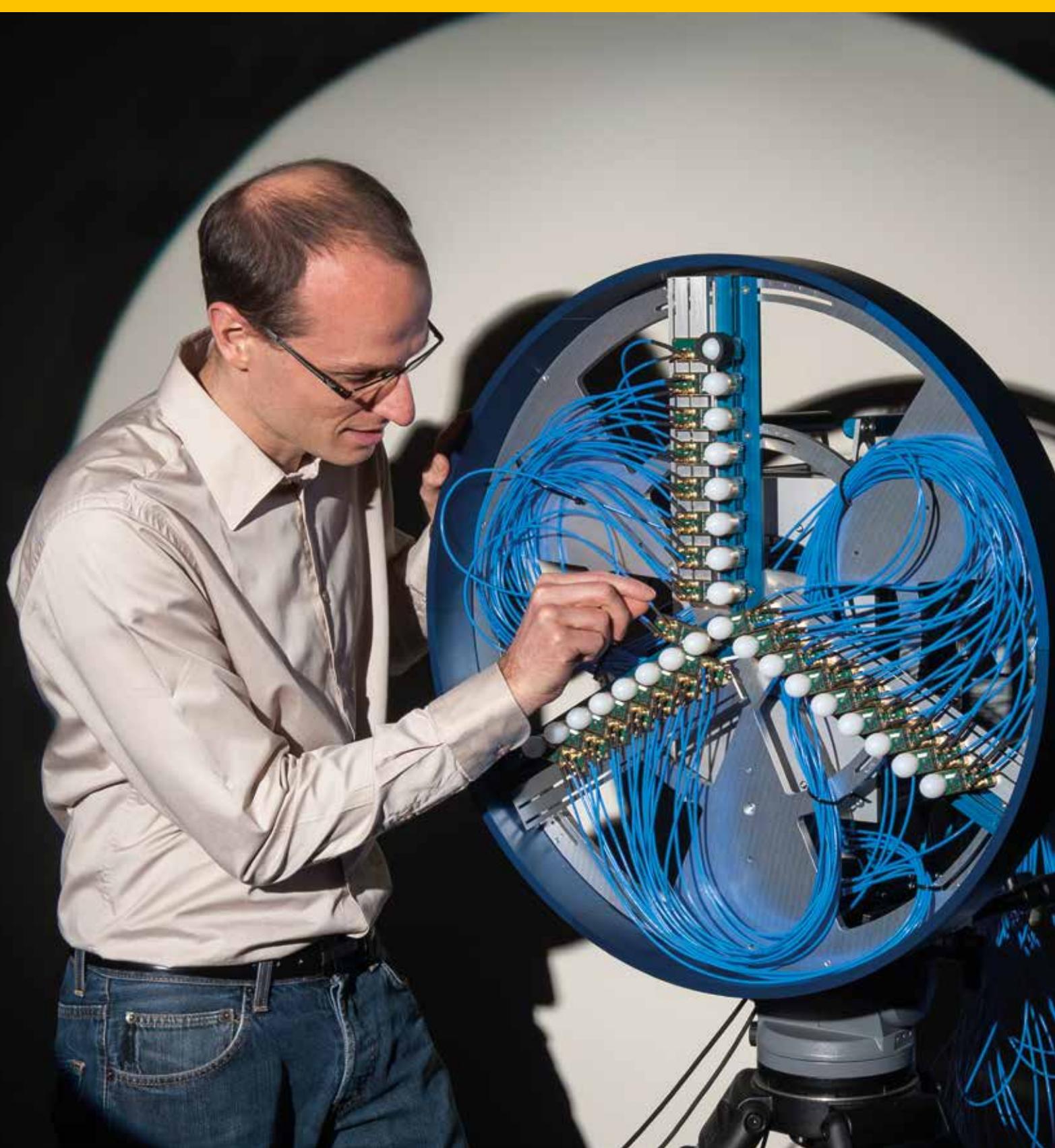
TEL. +49 761 5159-534

MICHAEL.SCHLECHTWEG@IAF.FRAUNHOFER.DE

ARNULF LEUTHER

TEL. +49 761 5159-329

ARNULF.LEUTHER@IAF.FRAUNHOFER.DE



HOCHFREQUENZELEKTRONIK



»Mit der Millimeterwellen-Radartechnologie versprechen wir uns beispielsweise, bei Wald- oder Tunnelbränden für mehr Sicherheit sorgen zu können. Die Herausforderung – und damit auch die Faszination – unseres Projekts besteht in der Verknüpfung vieler verschiedener Fachrichtungen innerhalb eines Systems: Hier kommt Fachwissen aus den Bereichen der III/V-Halbleiter-technologie, des Schaltungsdesigns, der Systemintegration sowie der Softwareentwicklung zum Einsatz.«

Markus Rösch, der enorm schnelle Sende- und Empfänger-module für die Millimeterwellenkamera entwickelt.

»With our millimeter-wave technology, we will be able to provide more safety, for instance during forest or tunnel fires. The challenge – and therefore the fascination – of our project lies in the combination of many different disciplines within one system: we rely on knowledge from the fields of III-V semiconductor technology, circuit design, system integration as well as software development.«

Markus Rösch, who is developing ultra-fast transmitter and receiver modules for millimeter-wave cameras.

MILLIMETER-WAVES LIGHT UP THE FOG MILLIMETERWELLEN LICHTEN DEN NEBEL

High-resolution images and videos on smartphones and digital cameras can meanwhile be taken for granted. However, we also take for granted that these images show those details we could also recognize with our eyes. This is different with millimeter-wave cameras: they reveal what is going on behind fog, clouds or smoke.

During difficult helicopter landing maneuvers in snow storms or heavy fog, pilots can easily lose orientation without a reliably working measuring system. It is thus essential for the safety of pilots and passengers to obtain reliable data of the exact height and position of the helicopter in real time so that potential obstacles can be indicated at an early stage. Similar conditions apply to fire rescue teams who can only guess what is going on behind the heavy smoke. In future, a millimeter-wave radar system could help to manage these situations without the emergency services taking any risk themselves.

To support this technology advancement, Fraunhofer IAF has been researching into the development of circuits and modules up to the terahertz frequency range for several years. Novel high-frequency components and terahertz circuits create the conditions necessary to realize a real-time-capable and high-resolution millimeter-wave camera in this interface between optics and electronics.

Besides their benefits for imaging applications, high and highest frequency components offer advantages in all cases where it is required to test materials, to transport big data volumes, to achieve high bandwidths or to apply highly sensitive detectors:

- Safety and security:
Millimeter-wave cameras as alternative to video or infrared cameras in limited visual conditions
- Communication:
Intelligent data transfer at up to 100 Gbit/s
- Mobility:
Millimeter-wave radar systems for distance and velocity measurements
- Quality control:
Contactless material testing with millimeter-waves
- Space:
Low-noise amplifier circuits for receivers of weather satellites of the latest generation



Hochauflöste Bilder und Videos erscheinen uns im Zeitalter des Smartphones und der Digitalfotografie als selbstverständlich. Selbstverständlich ist für uns aber auch, dass tatsächlich das aufgenommen wird, was wir mit bloßem Auge sehen. Millimeterwellenkameras hingegen zeigen uns eine andere Welt: beispielsweise was hinter Nebel, Wolken oder Rauch passiert.

Bei schwierigen Landemanövern von Hubschraubern in Schneegestöber oder dichtem Nebel können Piloten ohne zuverlässig funktionierende Messgeräte schnell die Orientierung verlieren. Für die Sicherheit von Piloten und Passagieren ist es daher essenziell, dass zuverlässige Daten von Höhe und Lage in Echtzeit erhoben und ausgewertet werden, sodass etwaige Hindernisse frühzeitig angezeigt werden können. Ähnliches gilt für Rettungskräfte, die bei Bränden im Einsatz sind und nur noch erahnen können, was hinter dickem Rauch vor sich geht. Hier könnte zukünftig ein bildgebendes Millimeterwellen-Radarsystem bei 100 GHz helfen, die Lage zu sichern, ohne dass sich Einsatzkräfte selbst in Gefahr begeben müssen.

Neuartige Hochfrequenz-Bauelemente und Terahertz-Schaltungen schaffen die Voraussetzungen, um in diesem Grenzbereich zwischen Optik und Elektronik eine echtzeitfähige und hochauflösende Millimeterwellenkamera zu realisieren.

Neben bildgebenden Anwendungen bieten die Hoch- und Höchstfrequenzbauelemente überall dort Vorteile, wo Materialien untersucht, große Datenvolumen übertragen, hohe Bandbreiten erzielt oder hochempfindliche Detektoren eingesetzt werden:

- Schutz und Sicherheit:
Millimeterwellenkameras als Alternative zu Video- oder Infrarotkameras bei eingeschränkten Sichtverhältnissen
- Kommunikation:
Intelligente Datenübertragung mit bis zu 100 Gbit/s
- Mobilität:
Millimeterwellen-Radarsysteme zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung
- Qualitätskontrolle:
Berührungslose Materialanalysen mit Millimeterwellen
- Weltraum:
Rauscharme Verstärkerschaltungen für Empfänger in Wettersatelliten der neuesten Generation

MILLIMETER-WAVE IMAGING AT 100 GHz

MARKUS RÖSCH

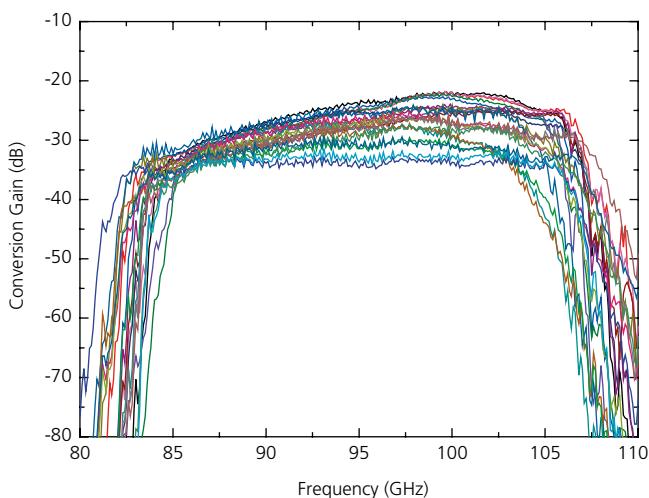
TEL. +49 761 5159-648

MARKUS.ROESCH@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – mm-WAVE CAMERA

- ACTIVE MODE: 1 – 8 TRANSMITTER
- SPARSE ARRAY: 24 RECEIVER
- DYNAMIC: 25 dB
- RF-BANDWIDTH: 20 GHz

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Measured conversion gain of 24 receiver modules over frequency.

Gemessener Konversionsgewinn von 24 Empfängermodulen über der Frequenz.

High-resolution imaging systems working in the millimeter-wave frequency range attain more and more attention for numerous applications. Fraunhofer IAF aims for a real time radar system at 100 GHz that serves for different scenarios with its active sensor technology and its analysis technique. Compared to conventional focal plane arrays, this system, namely synthetic aperture radar, allows to reduce the number of detectors, by correlating the received signals. For the development of a prototype, a system concept, including new low cost packaging technologies for high frequency devices, system simulations, the development of correlation algorithms and electronics for data processing, has to be evaluated.

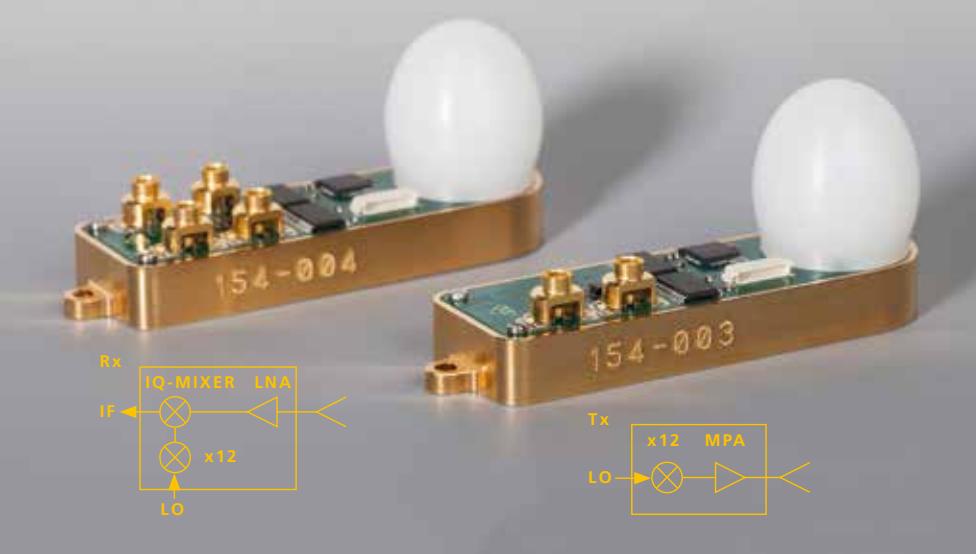
In clouds, fog and smoke, the opacity of millimeter-waves is significantly higher than the one in the optical and infrared spectral range. Real time millimeter-wave systems, thus, are a promising addition or alternative to video and infrared cameras. An active detector has an important advantage, that is to calculate the distance to the reflecting object of interest from the time delay of the emitted signal. Furthermore, the active »illumination« makes the sensor independent of external radiating sources. Focal plane arrays working at optical and infrared wavelengths demand a high number of detectors (pixels), which need to be densely packed. This is difficult to realize in the frequency range of 100 GHz (W-band) due to the size of the receiver modules at this wavelength. Therefore, Fraunhofer IAF envisages an advanced millimeter-wave camera based on a system with synthetic aperture in form of a sparse array. This approach allows to calculate the image by correlating the received signal of fewer receivers, compared to a focal plane array, without losing too much resolution. Possible applications of such a system are civil protection scenarios such as forest and tunnel fires, as well as security systems for body scanners or landing aid systems for helicopters.

BILDGEBUNG MIT MILLIMETERWELLEN BEI 100 GHz

Hochauflösende bildgebende Systeme, die im Wellenlängenbereich von einigen Millimetern arbeiten, gewinnen in zahlreichen Anwendungen zunehmend an Bedeutung. Ziel des Fraunhofer IAF ist es, ein echtzeitfähiges, bildgebendes Radarsystem bei 100 GHz zu entwickeln, das mit seiner aktiven Sensorik und seinen Analyseverfahren zahlreiche Einsatzszenarien bedienen kann. Im Vergleich zu einem konventionellen Focal-Plane-Array ermöglicht dieses Prinzip, durch Korrelation der empfangenen Signale, die Anzahl der Empfängermodule stark zu reduzieren. Für die Entwicklung eines solchen Prototyps müssen verschiedene Systemparameter wie Aufbautechnologien von Hochfrequenzmodulen, Systemsimulationen, Korrelationsalgorithmen und digitale Datenverarbeitung untersucht werden.

Im Vergleich zum optischen und infraroten Spektralbereich ist das Durchdringungsvermögen von Millimeterwellen in Wolken, Nebel und Rauch deutlich höher. Echtzeitfähige Millimeterwellensysteme sind deshalb eine vielversprechende Ergänzung oder Alternative zu Video- und Infrarotkameras. Ein aktiver Detektor hat den Vorteil, dass er den Abstand zum reflektierenden Messobjekt aus dem zeitverzögert empfangenen Signal errechnet. Darüber hinaus macht die aktive Beleuchtung der Szene den Sensor unabhängig von externen Strahlungsquellen. Focal-Plane-Arrays, die im sichtbaren und infraroten Spektralbereich arbeiten, benötigen eine hohe Anzahl von Detektoren (Pixeln), die sehr dicht gepackt sein müssen. Dies ist im Bereich von 100 GHz (W-Band) aufgrund der Größe der Empfängermodule bei dieser Wellenlänge sehr schwierig zu realisieren. Deshalb verfolgt das Fraunhofer IAF für seine Millimeterwellenkamera den Ansatz einer synthetischen Apertur in Form eines ausgedünntes Arrays. Diese Methode erlaubt es, das Bild durch Korrelation der empfangenen Signale aus wenigen Empfängern zu berechnen, ohne zu viel an Auflösung einzubüßen. Mögliche Anwendungen eines solchen Systems bestehen im Bereich Katastrophenschutz bei Wald- oder Tunnelbränden, sowie bei Sicherheitssystemen in Form von Körperscannern oder als Landehilfe für Hubschrauber.

Bisherige Hoch- und Höchstfrequenz-Aufbauten wurden in zuverlässiger Split-Block-Technik realisiert. Diese bewährte Technologie erfordert allerdings einen Übergang von der Mikrowellenschaltung (MMIC) in einen Hohlleiter, was den Aufbau sehr zeit- und kostenaufwendig macht. Weiterhin muss eine Quarz-Antenne prozessiert, vereinzelt und exakt in das Split-Block-Gehäuse eingeklebt werden. Zur Vereinfachung, Miniaturisierung und zur besseren Reproduzierbarkeit der bestehenden Aufbautechnik wurden neue Antennen- und Aufbaukonzepte auf kostengünstigen, planaren Trägermaterialien untersucht und getestet. Dies verringert nicht nur die Größe der Module, sondern auch den Hardwareaufwand und somit deutlich die Kosten.



2

Previous high frequency modules were assembled in reliable split-block techniques. This technology demands a transition from the monolithic microwave integrated circuit (MMIC) into a rectangular waveguide, which makes the assembling very time consuming and costly. Furthermore, quartz antennas have to be processed, diced and mounted into the split-block housing. For simplification, miniaturization and better reproducibility, new antenna and assembling concepts on planar hybrid printed circuit boards (PCB) have been evaluated and tested. This reduces not only the size but also the amount of the required hardware, which leads to significantly lower costs.

For the Fraunhofer IAF millimeter-wave camera prototype, 24 receivers and one transmitter module have been designed, built and tested using the technology described above. Fig. 2 shows a block diagram and a picture of fully assembled receiver (Rx) and transmitter (Tx) modules. Hereby, the Tx consists of a times twelve frequency multiplier (x12) providing the W-band signal. This signal is then amplified by a medium power amplifier (MPA) to a maximum output power of around 10 dBm. The Rx is designed analogically and consists of an IQ-mixer and the same multiplier to mix the W-band signal to an IF-frequency of 10 MHz. The IQ-mixer provides two IF-signals, the inphase (I) and the quadrature (Q) component. All these devices have been designed and assembled using in-house resources. The modules include a planar broadband antenna and a dielectric lens to increase the antenna gain, which is made of high-density polyethylene (HDPE). The fabrication of these lenses is easier, less time consuming and less expensive compared to conventional feed horns. For the receiver and the transmitter, the same housing, antenna and lens is used, resulting in a total module size of $60 \times 20 \times 25 \text{ mm}^3$.

The receiver devices have been characterized and tested individually in terms of gain and frequency bandwidth before using them in the camera prototype. Fig. 1 shows the measured

conversion gain of all 24 receiver modules. The received power of the transmitter was measured at a distance of 50 cm between Tx and Rx. Our tested devices all behave similar over frequency and achieve a usable frequency bandwidth of 16 GHz (87 – 103 GHz).

Fig. 3 shows the back-end electronics of the camera prototype, designed and built at Fraunhofer IAF, including 24 receivers and one transmitter which is located in the center of the aperture. The aperture was designed to keep the arrangement of the receivers as flexible as possible. In this prototype, the receivers are arranged in a Y-geometry in order to facilitate the correlation and data processing algorithms. The diameter of the aperture is approximately 50 cm to assure sufficient resolution even for objects in up to 20 m distance. The electronics consist of a specifically developed analog to digital conversion board and a commercial field programmable gate array (FPGA) evaluation board from Xilinx. All 24 receiver IF-signals are sampled parallel at 50 MSPS, resulting in a total data rate of 1.2 Gbit/s. The data is stored in the FPGA's double data rate memory and can then be transferred by an on-board Ethernet interface to a computer for further data processing. Correlation, near field correction and image reconstruction is currently done offline using Matlab.

First measurements have been performed using corner reflectors at a distance of around 15 m. Up to four corner reflectors were used to depict point sources. They were positioned in various spots within the camera's field of view. The results were then compared with simulation. This comparison revealed a very good agreement between measurement and simulation, which proves the functionality of the system.



3

2 Block diagrams and pictures of fully assembled transmitter (Tx) and receiver (Rx) modules.
Ersatzschaltbild und Aufnahme eines aufgebauten Sende- (Tx) und Empfängermoduls (Rx).

3 Back-end electronics of the Fraunhofer IAF millimeter-wave camera prototype.

Prototyp der Millimeterwellenkamera des Fraunhofer IAF mit Blick auf die Ausleseelektronik.

Für den Prototyp der Millimeterwellenkamera des Fraunhofer IAF wurden 24 Empfänger- module und ein Sendemodul mit oben beschriebener Technologie designt, aufgebaut und getestet. Abb. 2 zeigt das Ersatzschaltbild und die Aufnahme eines Sende- (Tx) und eines Empfängermoduls (Rx). Der Tx besteht hierbei aus einem Frequenzverzwölffacher (x12), der das W-Band-Signal bereitstellt. Dieses wird dann mittels eines Verstärkers (MPA) auf maximal 10 dBm verstärkt. Der Rx ist analog designt und besteht aus einem IQ-Mischer und demselben Vervielfacher, um das W-Band-Signal auf eine Zwischenfrequenz von 10 MHz herunter zu mischen. Der IQ-Mischer stellt zwei Ausgangssignale zur Verfügung, die Inphase- (I) und die Quadraturkomponente (Q). Alle Komponenten wurden mit hauseigener Technologie entwickelt und aufgebaut. Um den Antennengewinn zu erhöhen, besitzen die Module eine planare breitbandige Antenne und eine HDPE-Linse (»high density polyethylene«). Die Herstellung solcher Linsen ist einfacher, weniger zeitaufwendig und viel günstiger als konventionelle Horn- antennen. Sowohl für den Sender als auch für den Empfänger wurden identische Gehäuse, Linsen und Antennen verwendet, woraus sich eine Modulgröße von $60 \times 20 \times 25 \text{ mm}^3$ ergibt.

Die Empfängermodule wurden bezüglich Verstärkung und Breitbandigkeit charakterisiert und getestet, bevor der Prototyp aufgebaut wurde. Abb. 1 zeigt den gemessenen Konversionsge- winn von 24 Empfängermodulen. Die empfangene Leistung wurde über eine Entfernung von 50 cm zwischen Sender und Empfänger gemessen. Die untersuchten Module verhalten sich alle sehr ähnlich über der Frequenz und erreichen eine Bandbreite von 16 GHz (87 – 103 GHz). Die Ausleseelektronik des Kamera-Prototyps mit 24 Empfängern und einem zentral angebrach- ten Sender sind in Abb. 3 zu sehen. Die Apertur wurde flexibel gewählt, um unterschiedliche Empfängeranordnungen zu ermöglichen. Vorerst sind die Empfänger Y-förmig angeordnet, was die Korrelationsalgorithmen und Datenverarbeitung vereinfacht. Der Durchmesser der Apertur beträgt ca. 50 cm, um eine ausreichende Auflösung für Objekte bis in bis zu 20 m Entfernung zu garantieren. Die Ausleseelektronik besteht aus einem eigens entwickelten Analog-Digital-Wandlerboard und einem kommerziellen Field-Programmable-Gate-Array (FPGA)-Evaluationboard von Xilinx. Alle 24 Zwischenfrequenz-Signale werden parallel mit 50 MSPS abgetastet, was eine Gesamtdatenrate von 1,2 Gbit/s ergibt. Die Daten werden dann im FPGA zwischengespeichert und können über eine Ethernet-Schnittstelle zur weiteren Datenverarbeitung an einen PC übertragen werden. Korrelation, Nahfeldnäherung und Bild- rekonstruktion werden momentan offline mit Matlab berechnet.

Mit diesem System wurden bereits erste Messungen auf eine Entfernung von 15 m durch- geführt. Hierzu wurden bis zu vier annähernd ideale Reflektoren benutzt, um Punktquellen darzustellen. Diese wurden an unterschiedlichen Positionen im Blickfeld der Kamera angebracht und die Messergebnisse dann mit Simulationen verglichen. Hieraus ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation, wodurch die Funktionsweise dieses Systems anhand einfacher Szenen nachgewiesen werden konnte.

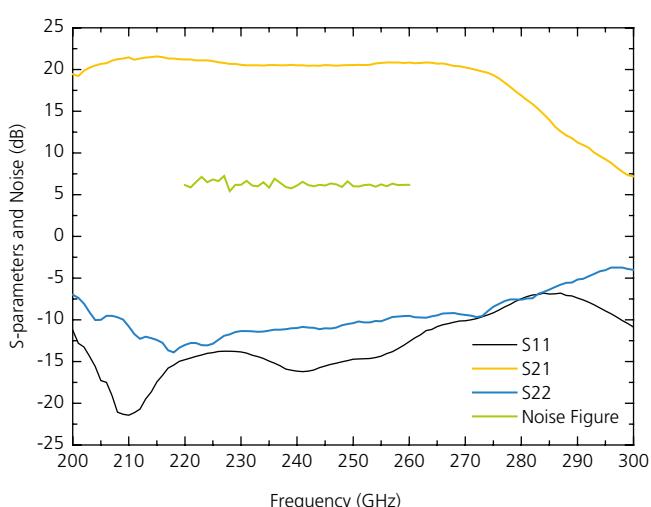
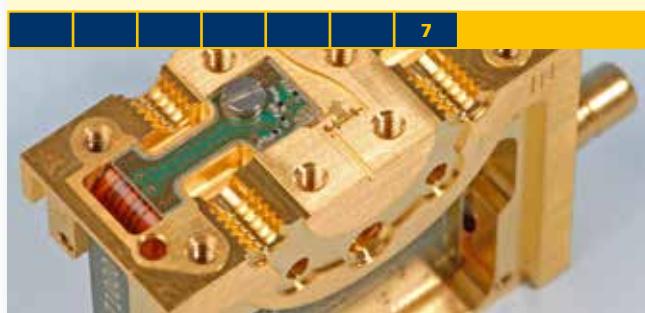
LOW-NOISE AMPLIFIERS FOR SPACE

ARNULF LEUTHER
TEL. +49 761 5159-329
ARNULF.LEUTHER@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – LOW-NOISE AMPLIFIERS

- InGaAs-BASED INTEGRATED CIRCUITS
- GATE LENGTH: 50 nm
- RECEIVER FREQUENCIES: 54, 89, 118, 165
183, 229 AND 243 GHz
- NOISE FIGURE: 6 dB AT 229 – 243 GHz

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Measured S-parameters and noise of a low-noise amplifier for the frequency range of 229 – 243 GHz.

Messung der S-Parameter und des Rauschens eines rauscharmen Verstärkers für den Frequenzbereich von 229 – 243 GHz.

The European Space Agency ESA is currently developing the next generation of meteorology satellites for the monitoring of the atmosphere and the surface of the earth in many different frequency bands of the electromagnetic spectrum. To achieve the required sensitivities of the instruments, the receiver noise figures have to be close to the best published results worldwide. Fraunhofer IAF's 50 nm gate length metamorphic high electron mobility transistor technology was chosen for the development of amplifiers for the 54, 89, 118, 165, 183, 229 and 243 GHz frequency bands.

Satellite assisted earth observation delivers raw data for short term weather forecasts as well as for long term climate models. The predictions based on these data have significant economic, social and political impact. For this reason, the development of new improved observation instruments is pushed worldwide. The European Space Agency ESA is currently developing meteorology satellites (MetOP-SG) which will monitor the atmosphere and the surface of the earth in many different frequency bands of the electromagnetic spectrum (Fig. 4).

Due to ESAs strong interest in increasing autarky of its space technology, preferably European suppliers are included in the satellite missions. Therefore, Fraunhofer IAF was assigned to develop low-noise amplifiers for three of the MetOP-SG observation instruments. The microwave sounder, the microwave imager and the ice cloud imager will provide information on temperature and humidity, clouds, ice particles, precipitation, sea ice and sea surface winds with high lateral and vertical resolution. To ensure the required sensitivities of the instruments, very demanding specifications for the receivers concerning small signal gain, input and output matching, gain flatness and noise figure are necessary. The demanded noise figures are close to the best results published. Fraunhofer IAF's 50 nm gate length metamorphic high electron mobility transistor (mHEMT) technology was chosen for the development of amplifiers for the 54, 89, 118, 165, 183, 229 and 243 GHz frequency bands.

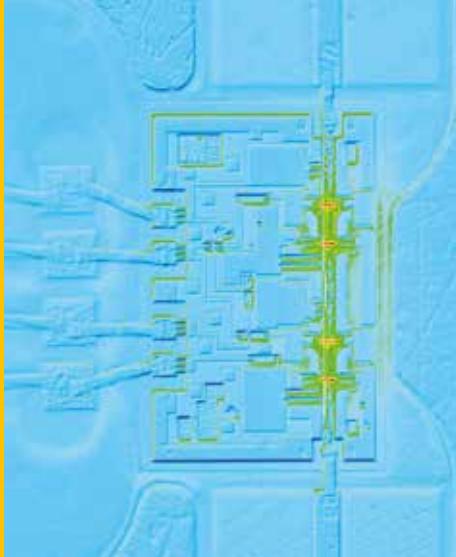
RAUSCHARME VERSTÄRKER FÜR DIE RAUMFAHRT

Die europäische Weltraumorganisation ESA entwickelt derzeit die nächste Generation meteorologischer Satelliten, die basierend auf einer großen Anzahl unterschiedlicher Frequenzbereiche des elektromagnetischen Spektrums die Atmosphäre und Oberfläche der Erde mit hoher Genauigkeit beobachten werden. Die angestrebte Empfindlichkeit der Beobachtungsinstrumente erfordert Empfängerrauschzahlen im Bereich der weltweit publizierten Rekordergebnisse. Die metamorphe »High-Electron-Mobility Transistor« (mHEMT)-Technologie des Fraunhofer IAF mit einer Gatelänge von 50 nm wurde für die Entwicklung von Verstärkern in den Frequenzbereichen 54, 89, 118, 165, 183, 229 und 243 GHz ausgewählt.

Die satellitengestützte Erdbeobachtung liefert Rohdaten sowohl für die Kurzzeit-Wettervorhersage als auch für Langzeit-Klimamodelle. Auf diesen Daten basierende Voraussagen haben wesentliche ökonomische, soziale sowie politische Auswirkungen. Deshalb wird die Entwicklung besserter Beobachtungsinstrumente weltweit vorangetrieben. Die Europäische Weltraumorganisation ESA entwickelt derzeit eine neue Generation meteorologischer Satelliten (MetOP-SG) für die genaue Beobachtung der Atmosphäre und der Erdoberfläche in einer Vielzahl von Frequenzbereichen des elektromagnetischen Spektrums (Abb. 4).

Aufgrund des Strebens der ESA nach größerer Autarkie ihrer Weltraumtechnologie werden bevorzugt europäische Zulieferer in das Satelliten-Programm aufgenommen. Das Fraunhofer IAF entwickelt rauscharme Verstärker für drei der MetOP-SG-Beobachtungsinstrumente. Der Microwave Sounder, der Microwave Imager und der Ice Cloud Imager werden Informationen bezüglich Temperatur, Feuchte, Wolken, Eispartikeln, Niederschlag sowie Vereisung und Oberflächenwinde des Meeres mit hoher lateraler und vertikaler Auflösung liefern. Für die benötigten Empfindlichkeiten der Instrumente sind herausfordernde Spezifikationen der Empfänger in Hinblick auf Kleinsignalverstärkung, Eingangs- und Ausgangsanpassung sowie Rauschzahl erforderlich. Die Rauschzahlen der einzelnen Frequenzbereiche liegen jeweils nahe der besten publizierten Ergebnisse. Mit der metamorphen mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF mit einer Gatelänge von 50 nm werden Verstärker in den Frequenzbereichen 54, 89, 118, 165, 183, 229 und 243 GHz entwickelt.

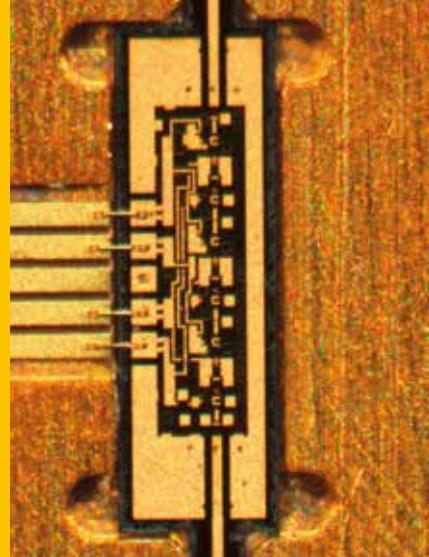
Die herausragenden Rauscheigenschaften der mHEMTs beruhen auf der hohen Elektronenbeweglichkeit der $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ -Kanalschicht und der hohen Transitfrequenz f_T der Bauelemente. Zur weiteren Verbesserung der Rauscheigenschaften beinhaltet die 50-nm-mHEMT-Schaltungstechnologie eine Passivierung der Transistoren in einem Material mit niedriger Dielektrizitätskonstante zur Reduzierung parasitärer Gate-Kapazitäten und einen zweiten optisch definierten Gate-Kopf zur Verminderung des Gatelinienwiderstands. Zur Unterdrückung unerwünschter Substratmoden werden die Wafer nach Prozessierung der Vorderseite auf 50 μm Dicke gedünnt. Anschließend werden mit Trockenätzung und nachfolgender Goldgalvanik von der Rückseite zur Vorderseite reichende Vias realisiert. Diese Wafer-Topologie erlaubt sowohl die



2

The outstanding noise performance of the mHEMTs is a result of the high electron mobility in the $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ channel layer of the transistor and the high transit frequency f_T of the devices. In order to improve noise performance, the 50 nm mHEMT MMIC technology includes a low-k dielectric transistor passivation layer to reduce parasitic gate capacitances as well as a second optical defined gate head to reduce the gate line resistance. To suppress parasitic substrate modes, the wafers are thinned down to 50 μm after front side processing. Subsequently, vias are dry etched through substrate and finally the wafers are gold plated on the back side. This wafer topology allows for the use of microstrip transmission lines, which have the lowest noise contribution at lower frequencies, as well as permitting grounded coplanar circuit designs for noise optimized amplifiers operated at frequencies beyond 100 GHz.

For the frequency bands above 118 GHz the original MetOP-SG planning was to use Schottky diodes for the receivers instead of amplifiers. But because of the very low noise figure demonstrated on module levels of up to 260 GHz, it was decided to start a second ESA project focusing on low-noise amplifiers (LNAs) for the frequency range between 165 and 243 GHz. In Fig. 3 the micrograph of a packaged amplifier covering the 229 and 243 GHz bands is shown. The waveguide transitions are included in the MMIC layout and the non-rectangular chip was separated by laser dicing. The measured S-parameters as well as the room temperature noise figure of the module are presented in Fig. 1. A small signal gain of more than 20 dB was achieved in the frequency range from 205 to 270 GHz in combination with an input and



3

output matching better than -10 dB in the MetOP frequency bands. The low noise figure of 6 dB at 229 and 243 GHz was determined by hot-cold measurements.

Due to the lack of repair possibilities, long term stability and high robustness against vibration, radiation and heat are necessary requirements for devices and circuits in space. Therefore, all devices have to pass extensive qualification test procedures, which in addition to the circuit development form the main part of the project work plan. The qualification tests are done in close cooperation with the Finnish company DA-Design and the Finnish research centre VTT/MilliLab who are responsible for the packaging and reliability tests. Finally, two complete 4 inch wafers will be qualified out of two different wafer batches. The detailed tests are still carried out, so far with very promising results. Thermal simulations and measurements of packaged devices were performed to exclude hot spots on the MMICs due to circuit design or packaging. As shown in the false colour infrared micrograph in Fig. 2, the highest temperatures (red) appear at the four transistor stages of the amplifier circuit. The transistor's increase in temperature of only 20 °C compared to its environment proves the low power consumption and the low thermal resistance of the adhesive bonding process used for the packaging of the MMICs in the gold covered brass split-block modules.

In September 2014 ESA has released the tender offer for the MetOP-SG RF receivers and IAF has submitted proposals to different consortia. The launch of the first satellite is planned for 2021, after all developments and testings are completed.



4

2 Thermal image of a packaged low-noise amplifier.

Thermografie eines aufgebauten rauscharmen Verstärkers.

3 Micrograph of a packaged 229 – 243 GHz MMIC. The on-chip integrated RF transitions extend into the waveguides of the split-block module.

Mikroskopaufnahme eines aufgebauten 229 – 243 GHz MMICs. Die im Chip integrierten Hochfrequenz-Übergänge ragen in den Wellenleiter des Split-Block-Moduls.

4 Animation of the MetOP second generation meteorological satellites.

Animation der MetOP-Meteorologie-Satelliten der nächsten Generation. © ESA – P. Carril.

Verwendung einer Mikrostreifen-Signalführung, welche die niedrigsten Rauschbeiträge bei geringen Frequenzen liefert, als auch ein koplanares Schaltungslayout für rauschoptimierte Verstärker oberhalb von 100 GHz.

In der ursprünglichen Planung für MetOP-SG war für die Frequenzbänder oberhalb von 118 GHz die Verwendung von Schottky-Dioden statt Verstärkern in den Empfängern vorgesehen. Erst durch die Demonstration sehr niedriger Rauschzahlen von Verstärkern auf Modulalebene bei Frequenzen bis 260 GHz wurde von der ESA ein weiteres Projekt mit dem Fokus auf rauscharmen Verstärkern für den Frequenzbereich 165 – 243 GHz ins Leben gerufen. In Abb. 3 ist die optische Mikroskopaufnahme eines aufgebauten Verstärkers für die Frequenzbänder 229 und 243 GHz zu sehen. Die Hohlleiterübergänge sind in das Schaltungslayout integriert und der nicht-rechteckige Chip wurde mittels Laser vereinzelt. Die gemessenen S-Parameter und das Raumtemperatur-Rauschen des Verstärkermoduls sind in Abb. 1 dargestellt. Es wurde eine Kleinsignalverstärkung von mehr als 20 dB im Frequenzbereich von 205 bis 270 GHz erzielt bei einer gleichzeitigen Ein- und Ausgangsanpassung von besser als -10 dB in den beiden MetOP-Frequenzbändern. Die sehr niedrige Rauschzahl von 6 dB bei 229 bis 243 GHz wurde durch Hot-Cold-Messungen bestimmt.

Aufgrund der mangelnden Reparaturmöglichkeiten sind Langzeitstabilität sowie Unempfindlichkeit gegenüber Vibration, Strahlung und Hitze wichtige Voraussetzungen für Bauelemente im Weltall. Alle Schaltungen müssen daher aufwendige Qualifizierungstests durchlaufen, welche neben der Schaltungsentwicklung einen erheblichen Anteil des Projektinhalts ausmachen. Die Qualifizierungstests erfolgen in enger Zusammenarbeit mit der finnischen Firma DA-Design und dem finnischen Forschungszentrum VTT/MilliLab, die zuständig für Modulaufbau und Zuverlässigkeitstests sind. Es werden jeweils zwei Wafer aus zwei unterschiedlichen Prozessdurchläufen vollständig qualifiziert. Die Testserien sind noch nicht abgeschlossen, zeigen aber bisher sehr vielversprechende Ergebnisse. Es wurden thermische Simulationen und Messungen an aufgebauten Schaltungen durchgeführt, um lokale Überhitzungen aufgrund des Schaltungsgesetzes oder der Aufbautechnik auszuschließen. Wie in der Falschfarben-Infrarotmikroskopie-Aufnahme (Abb. 2) sichtbar, erscheinen die höchsten Temperaturen (rot) im Bereich der vier Transistorstufen der Verstärkerschaltung. Der Temperaturanstieg der Transistoren gegenüber der Umgebungstemperatur von nur 20 °C ist auf die geringe Leistungsaufnahme der Schaltungen sowie auf einen niedrigen thermischen Widerstand der, für den Einbau in das vergoldete Messing-Split-Block-Modul verwendeten, Klebeverbindung zurückzuführen.

Im September 2014 wurde von der ESA das Ausschreibeverfahren für die MetOP-SG-Hochfrequenzempfänger eröffnet. Das Fraunhofer IAF hat Angebote an verschiedene Bietergemeinschaften abgegeben. Der Start des ersten Satelliten ist nach erfolgreichem Abschluss aller Entwicklungsarbeiten und Tests für das Jahr 2021 geplant.

TOWARDS TERAHERTZ COMMUNICATION SYSTEMS

THOMAS MERKLE
TEL. +49 761 5159-555
THOMAS.MERKLE@IAF.FRAUNHOFER.DE

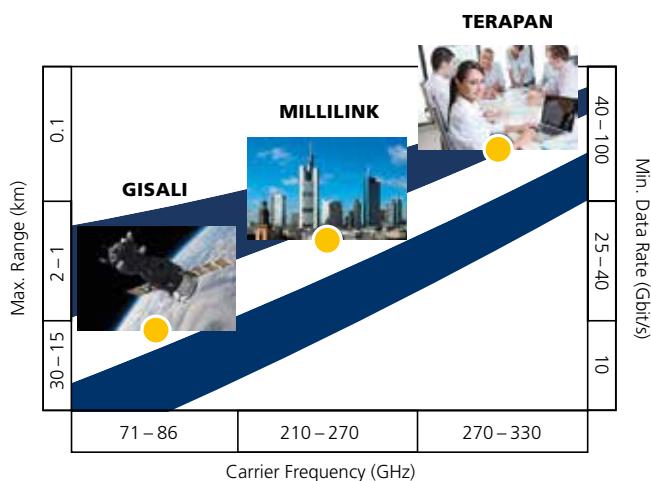
SPOT ON – DIRECTIONAL DATA LINK

- COMPACT TRANSMITTER MODULE
- CARRIER FREQUENCY: 240 GHz
- DATA RATE: 40 Gbit/s
- DISTANCE: 1000 m

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



6



1 Selected projects on millimeter-wave and THz communication systems at Fraunhofer IAF and their specific target applications.
Ausgewählte Projekte zu Millimeterwellen- und THz-Kommunikationssystemen am Fraunhofer IAF mit ihren Zielanwendungen.

The millimeter-wave and terahertz frequency bands are appealing options for the implementation of wireless multi-gigabit communication systems. Starting at 60 GHz, broad continuous frequency bands are available for this purpose. The ambition of Fraunhofer IAF and its partners has been to exploit the possible spectrum up to THz frequencies for various communication systems. The focus is along the whole value chain. The key enabler is the institute's high frequency metamorphic HEMT technology. As of today, Fraunhofer IAF offers various optimized front end transmit and receive solutions up to 300 GHz depending on range and required data rates. Current projects address indoor, terrestrial as well as ground-to-satellite applications.

It is certainly true that the development of millimeter-wave and THz communication systems is technically motivated by the broad available frequency spectrum. However, there are several other reasons to list. First, the available spectrum is less congested and fragmented compared to the microwave frequency bands below 30 GHz. Second, the systems can exhibit narrow beam widths and the required antenna size is kept small. Thirdly, frequencies can be re-used, interference with other systems is minimized and eavesdropping is very difficult at the physical layer (PHY). Finally, so-called light licensing schemes do already exist or are anticipated to be introduced by the spectrum management authorities. This means that it is inexpensive to acquire an operation license for a directive point-to-point link. 71 – 76 as well as 81 – 86 frequency bands (»E-band«), for instance, have become subjects of interest for commercial purposes within the last years.

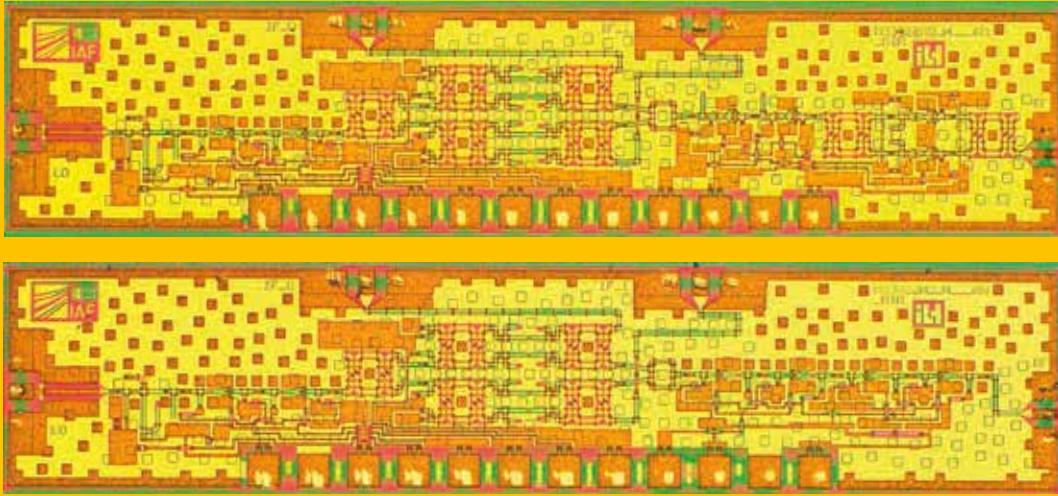
On the downside, the use of links at millimeter-wave and THz frequency bands have the reputation of being limited to short distances of up to a few kilometers at its best. This year, groundbreaking results from the project GISALI-ACceESS have demonstrated that links over more than 15 km are possible at E-band. In this project, Fraunhofer IAF collaborates with the University of Stuttgart, the Karlsruhe Institute of Technology KIT, and Radiometer Physics GmbH. The University of Stuttgart

AUF DEM WEG ZU TERAHERTZ-KOMMUNIKATIONSSYSTEMEN

Die Millimeterwellen- und Terahertz-Frequenzbänder sind für die Realisierung von drahtlosen Multi-Gigabit-Kommunikationssystemen sehr attraktiv. Große zusammenhängende Frequenzbänder stehen ab 60 GHz aufwärts zur Verfügung. Ziel des Fraunhofer IAF ist die Ausnutzung des Spektrums bis in den Terahertz-Bereich für verschiedenste Kommunikationsanwendungen. Das Augenmerk liegt auf der ganzen Wertschöpfungskette des Systems, wobei die metamorphe »High-Electron-Mobility Transistor« (mHEMT)-Technologie des Instituts das Schlüsselement ist. Bereits heute bietet das Fraunhofer IAF verschiedene Front-End-Sende- und Empfangslösungen bis 300 GHz an, je nach angestrebter Entfernung und Datenrate. Die gegenwärtigen Projekte beinhalten sowohl terrestrische als auch Satelliten-Anwendungen.

Die Entwicklung von Millimeterwellen- und THz-Kommunikationssystemen ist technisch zunächst durch das große verfügbare Frequenzspektrum begründet. Darüber hinaus ist erstens, das Spektrum weniger überfüllt und fragmentiert als in den Frequenzbändern unterhalb von 30 GHz. Zweitens können kleine Antennen mit gleichzeitig sehr gerichteter Abstrahlung realisiert werden. Störungen anderer Systeme werden damit minimiert, weshalb drittens, Frequenzen räumlich wiederverwendet werden können. Ein Abhören auf dem Physical Layer (PHY) mit einfachen technischen Mitteln ist nicht mehr möglich. Schließlich sind als letzter Punkt die vereinfachten Lizenzierungsbedingungen für Richtfunkstrecken über 60 GHz zu nennen. Ein gutes Beispiel dafür sind die Frequenzbänder 71 – 76 GHz und 81 – 86 GHz (gelegentlich als »E-band«-Links bezeichnet), die in den letzten Jahren deshalb verstärktes kommerzielles Interesse gewonnen haben. Bisher wurden Richtfunkstrecken in den Millimeterwellen- und THz-Frequenzbändern nur für kurze Strecken bis einige Kilometer eingesetzt. Dieses Jahr haben Ergebnisse aus dem Projekt GISALI-ACceESS jedoch demonstriert, dass Funkstrecken mit einer Länge von mehr als 15 km im E-Band möglich sind. In diesem Projekt kooperiert das Fraunhofer IAF mit der Universität Stuttgart, dem Karlsruher Institut für Technologie KIT und der Radiometer Physics GmbH. Die Universität Stuttgart hat erfolgreich Übertragungsversuche mit Datenraten von 15 Gbit/s bei verschiedenen Wetterbedingungen durchgeführt. Dies zeigt, wie Millimeterwellenschaltungen (MMICs) auf der leistungsfähigen mHEMT-Technologie Wegbereiter für technische Durchbrüche in den Millimeterwellen- und THz-Frequenzbändern sind. Eine Auswahl kürzlich abgeschlossener und gegenwärtig laufender Projekte des Fraunhofer IAF sind in Abb. 1 zusammengefasst.

Terrestrische Millimeterwellenverbindungen sind auch Teil des Entwicklungsplans für Backhaul-Netze der nächsten 5G-Mobilfunksysteme. Ziel des Projekts GISALI-ACceESS ist die Übertragung einer Datenrate von mehr als 10 Gbit/s über eine Entfernung von 30 km. Damit wird die Machbarkeit von Satellitenverbindungen nachgewiesen. E-Band-Langstreckenkommunikation ist auch eine attraktive Lösung für ländliche Gebiete oder als Backup für kritische optische Glasfaserverbindungen. In Katastrophenfällen ist die ad-hoc-Installation von E-Band-Links eine Möglichkeit für die schnelle Wiederherstellung der Kommunikationsinfrastruktur.



2

successfully completed transmission experiments under different weather conditions with data rates of 15 Gbit/s. This is also an excellent example of how carefully designed monolithic microwave integrated circuits (MMICs) based on Fraunhofer IAF's high-performance metamorphic HEMT (mHEMT) technologies finally become enablers for technical breakthroughs at mmW/THz frequencies. A selection of projects recently completed or currently in progress at Fraunhofer IAF is depicted in Fig. 1.

Millimeter-wave terrestrial links are also on the roadmap as an option for backhaul networks of next generation 5G mobile phone systems. The project GISALI-ACCeESS targets final data rates of more than 10 Gbit/s over a distance of 30 km. When this target will be achieved the system will be suitable for satellite applications. E-band long distance communication links are also attractive candidates for inexpensive rural area access or as a backup for critical fibre optical links. In case of disaster, the ad-hoc installation of E-band links is an option for the fast recovery of damaged communication infrastructure.

The completed project Millilink investigated communication links over 1 km distance at the frequency band of 210 – 270 GHz (»H-band«). Data rates of more than 40 Gbit/s were demonstrated. These medium range multi-gigabit links might be attractive in congested urban areas, complementing fiber-optical links. Temporary events and festivals make up other usage scenarios. Such a scenario requires the installation of ad-hoc high-speed networks that connect the different organizing teams, e. g. media, police as well as technical and first-aid teams, but also visitors via distributed hotspots. Fraunhofer IAF currently works on new integrated transmit and receive (Rx/Tx) MMICs for H-band links adding more functionality and further increasing their performance.

Wireless high-speed short range communication below a 100 meter distance is attractive for data center networks and small-cell/pico-cell backhaul links. For machine-to-machine communication total energy consumption may be of concern.

As part of the research training group »Micro Energy Harvesting« of the University of Freiburg, Fraunhofer IAF investigates low-energy transmit and receive concepts. First MMICs were designed for binary amplitude-shift keying (BASK) and on-off keying (OOK) modulation formats. The feasibility of data rates higher than 15 Gbit/s at a carrier frequency of 110 GHz was demonstrated. For small-cell applications, Fraunhofer IAF developed an energy saving, highly-linear Rx/Tx chipset at 60 GHz. This work was done in collaboration with Alcatel Lucent Deutschland AG. It is also an example of Fraunhofer IAF's capabilities in designing customized MMICs with its mHEMT technology according to the specifications of its industry partners. »First-pass success« with quick turn-around time was achieved thanks to the well established modeling and characterization infrastructure.

The recently started project TeraPan explores electronic beam-forming communication links at 300 GHz with data rates of up to 100 Gbit/s. Multiple input multiple output (MIMO) indoor links are first candidates for such a system. Integrated Rx/Tx MMICs with in-phase and quadrature phase (IQ) data inputs were manufactured on the Fraunhofer IAF's 35 nm mHEMT technology in 2014 (Fig. 2). The typical performance of a Tx MMIC is 1 mW measured output power and an IQ-channel conversion gain of 5 dB. Fraunhofer IAF has also focused on the generation of the local oscillator signal for the beam-steering of the transmitted and received signal. A direct digital synthesizer based 4-channel local oscillator generation scheme is currently explored (Fig. 3). At the output frequency of 100 GHz the measured phase noise is -97 dBm at 100 kHz frequency offset.

Fraunhofer IAF has been following a roadmap towards THz communication systems for several years. First Rx/Tx key components for example were demonstrated at 600 GHz. Higher integration as well as packaging concepts are currently in work. Our partners can be the first to build upon this unique know-how and significantly shorten the required implementation time for their system concepts.



3

2 Integrated 300 GHz transmit (Tx) and receive (Rx) MMICs manufactured using Fraunhofer IAF's 35 nm mHEMT technology.

Integrierte 300-GHz-Sende (Tx)- und Empfangs (Rx)- MMICs, gefertigt in der 35-nm-mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF.

3 Direct digital synthesis (DDS) module for the generation of local oscillator signals.
The signals are multiplied to 100 GHz using a Fraunhofer IAF multiplier by x12 MMIC with an output power of 10 dBm (10 mW).

Direkte-digitale-Synthese (DDS)-Modul zur Generierung der Lokaloszillatorkomponenten. Die Ausgangssignale werden mit integrierten x12-Vervielfacher-MMICs des Fraunhofer IAF auf 100 GHz umgesetzt. Die Ausgangsleistung bei 100 GHz beträgt 10 dBm (10 mW).

4 300 GHz transmit module with broadband data inputs from 0 – 50 GHz.

Integriertes Sendemodul bei 300 GHz mit breitbandigen Dateneingängen von 0 – 50 GHz.



4

Das erfolgreich beendete Projekt Millilink untersuchte Richtfunkstrecken über Entfernungen von 1 km im Frequenzbereich 210 – 270 GHz (»H-band«). Datenraten von mehr als 40 Gbit/s wurden dabei erreicht. Diese drahtlosen Multi-Gigabit-Verbindungen sind für mittlere Entfernungen in städtischen Gebieten als ergänzende Lösung für Glasfaserstrecken interessant. Temporäre Großveranstaltungen sind ein weiteres Anwendungsgebiet: Sie erfordern die ad-hoc-Installation von schnellen Netzwerken für Medien, Polizei, technische Helfer und Besucher. Das Fraunhofer IAF arbeitet gegenwärtig an neuen integrierten Sende- und Empfangs (Rx/Tx)-MMICs für H-Band-Links mit mehr Funktionalität und verbesserten Übertragungseigenschaften.

Extrem schnelle Kurzstreckenkommunikation unter 100 m ist für Netzwerke in Rechenzentren und für Small-Cell-/Pico-Cell-Backhaul-Verbindungen attraktiv. Für die Machine-to-Machine-Kommunikation ist der Gesamtenergieverbrauch wichtig. Innerhalb des Graduiertenkollegs »Micro Energy Harvesting« der Universität Freiburg untersucht das Fraunhofer IAF Sende- und Empfangskonzepte mit geringem Energiebedarf. Die ersten MMICs wurden für Binary-Amplitude-Shift-Keying (BASK)- und On-Off-Keying (OOK)-Modulationsformate entworfen. Dabei konnte die Machbarkeit von Datenraten über 15 Gbit/s bei einer Trägerfrequenz von 110 GHz demonstriert werden. Für Small-Cell-Anwendungen hat das Fraunhofer IAF einen energiesparenden, hoch-linearen Rx/Tx-Chipsatz bei 60 GHz entwickelt. Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Alcatel Lucent Deutschland AG durchgeführt und ist ein Beispiel für die Kompetenz des Fraunhofer IAF im Bereich Entwurf von kundenspezifischen MMICs für Industrikunden mit erfolgreicher Fertigstellung im ersten Entwicklungszyklus.

Das Projekt TeraPan untersucht Richtfunkstrecken mit elektronischer Strahlschwenkung bei 300 GHz mit Datenraten von bis zu 100 Gbit/s. Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)-Verbindungen in Gebäuden sind erste Einsatzszenarien solcher Systeme. Integrierte Rx/Tx-MMICs wurden auf der 35-nm-mHEMT-Technologie des Fraunhofer IAF im Jahr 2014 gefertigt (Abb. 2). Die typischen gemessenen Eckdaten sind 1 mW Ausgangsleistung des Tx-MMICs und ein Konversionsgewinn von 5 dB. Das Fraunhofer IAF hat sich daneben auf die Generierung des Lokaloszillators zur Strahlschwenkung des Sende- und Empfangssignals konzentriert. Ein auf der direkten digitalen Synthese (DDS) basierendes Verfahren zur Erzeugung eines 4-Kanal-Lokaloszillatorsignals wird derzeit untersucht (Abb. 3). Bei der Ausgangsfrequenz von 100 GHz wurde bei 100 kHz Abstand vom Träger ein Phasenrauschen von -97 dBm gemessen.

Das Fraunhofer IAF verfolgt seine Forschungsstrategie im Bereich der THz-Kommunikation bereits seit einigen Jahren. So wurden die ersten Rx/Tx-Schlüsselkomponenten bereits bei 600 GHz gezeigt. Derzeitige Arbeitsschwerpunkte sind eine wesentlich höhere Integration und neue Aufbaukonzepte. Unsere Partner werden auf diesen Erfahrungsschatz zugreifen können und damit signifikant die Umsetzungszeit ihrer Systemkonzepte verkürzen.

POWER ELECTRONICS

MICHAEL MIKULLA
TEL. +49 761 5159-267
MICHAEL.MIKULLA@IAF.FRAUNHOFER.DE

RÜDIGER QUAY
TEL. +49 761 5159-843
RUEDIGER.QUAY@IAF.FRAUNHOFER.DE



LEISTUNGSELEKTRONIK



»Geht nicht, gibt's nicht: Noch vor 10 Jahren war die drahtlose Übertragung von 10 Megabits pro Sekunde auf das Handy utopisch, heute steuert man dank Millimeterwellen-Technologie und ihrer enormen Leistungsfähigkeit auf 10 Gigabits pro Sekunde zu.«

Rüdiger Quay, der schnelle und energieeffiziente Millimeterwellen-Leistungsverstärker für den Mobilfunk realisiert.

»Everything is possible: just ten years ago, the wireless data transmission of 10 megabits per second to a mobile phone was utopian. Today we are moving towards a transmission of 10 gigabits per second thanks to millimeter-wave technology and its enormous power.«

Rüdiger Quay, who realizes energy efficient millimeter-wave power amplifiers for mobile communication.

HOT SPOT: MOBILE WITH GIGABITS

HOT SPOT: MIT GIGABITS MOBIL UNTERWEGS

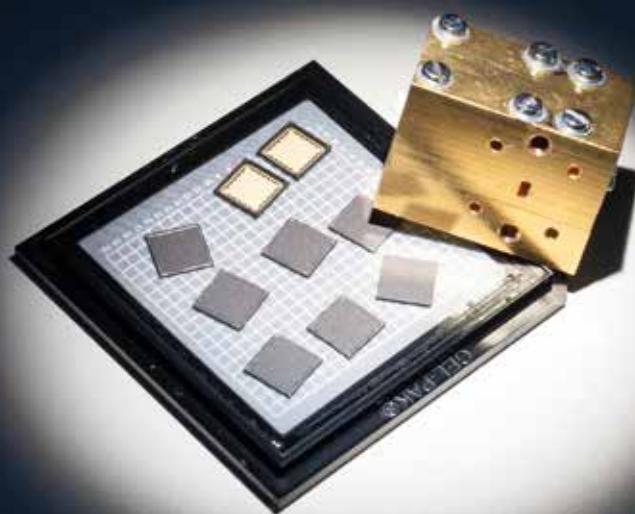
Our communication behavior has rapidly changed in recent years: we are almost always online with our smartphone, tablet or PC, we communicate quickly and directly and send pictures and videos around the globe. Accessing information via smartphones and taking music and games with us wherever we go has become normal for most of us – expecting fast and reliable connections everywhere without time delay.

The technology behind it is complex and needs to keep pace with the growing requirements: Transferring more data in less time requires high-performance technologies that transmit and receive our data via a base station, a radio mast, and wireless local loops into and out of the provider network. In order to cover the enormous capacity which the internet is supposed to provide by 2020 (mobile communication standard: 5G), we develop integrated circuits based on gallium nitride that provide the crucial circuits for high-performance connections. Last year we succeeded in realizing microwave amplifiers as integrated circuits with 10 W output power at 30 GHz, which transfer the user data from the radio masts directly to the provider network and into the internet, independent from weather conditions.

In the near future, these microwave radio links shall facilitate the availability of not only megabits, but gigabits on smartphones to all users – a data rate sufficient even for interactive video games through the mobile network.

The high-frequency power electronics developed at Fraunhofer IAF ensure extremely fast and energy-efficient transmission of high data rates with low power losses:

- Communication:
 - High-speed connections in the mobile network for high data rates
 - Mobile data links with high range and gigabit data rates
- Space technology:
 - High resolution weather-independent radar systems for earth observation
 - Extremely fast satellite links
- Meteorology:
 - High frequency power sources for weather observation



Unser Kommunikationsverhalten hat sich in den letzten Jahren stark verändert: mit Smartphone, Tablet oder am PC sind wir ständig online, kommunizieren schnell und direkt und versenden Bilder und Videos rund um den Globus. Auch der Abruf von Informationen über das Smartphone sowie Musik oder Spiele immer parat zu haben ist für viele selbstverständlich geworden – und zwar möglichst überall und ohne Verzögerung.

Die Technik dahinter ist komplex und muss mit den wachsenden Anforderungen Schritt halten: Um immer mehr Daten in immer kürzerer Zeit zu übertragen, sind hochleistungsfähige Technologien gefragt. Diese müssen unsere Daten über Basisstation, Mobilfunkmast und Richtfunknetz ins Anbieternetz übermitteln und wieder abrufen. Für die enormen Kapazitäten, die das Internet 2020 (Standard für die mobile Kommunikation: 5G) bieten soll, entwickeln wir am Fraunhofer IAF integrierte Schaltungen auf Basis von Galliumnitrid, die die entscheidenden Schaltkreise für Hochleistungs-Anbindungen liefern. Im letzten Jahr haben wir Richtfunkverstärker als integrierte Schaltungen mit 10 W Leistung bei 30 GHz präsentiert, die Nutzerdaten aus den Mobilfunkmasten direkt und wetterunabhängig ins Anbieternetz und somit ins Internet übermitteln können.

Solche direkten Richtfunkstrecken sollen zukünftig dafür sorgen, dass jedem Nutzer nicht mehr nur Megabits sondern Gigabits auf seinem Handy zur Verfügung stehen – eine Datenrate, die selbst für interaktive Videospiele über das mobile Netz ausreicht.

Die am Fraunhofer IAF entwickelte hochfrequente Leistungselektronik sorgt für eine enorm schnelle und energieeffiziente Übertragung hoher Datenraten:

- Kommunikation:
Hochgeschwindigkeits-Verbindungen im Mobilfunknetz für hohe Datenraten
Mobile Datenlinks mit hoher Reichweite und Datenraten im Gigabit-Bereich
- Weltraumtechnologie:
Hochauflösende wetterunabhängige Radare für die Erdbeobachtung
Extrem schnelle Satellitenverbindungen
- Meteorologie:
Hochfrequenz-Leistungsquellen für die Wetterbeobachtung

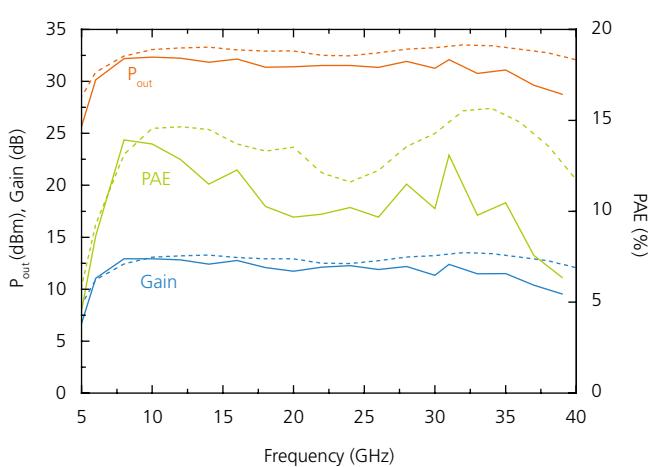
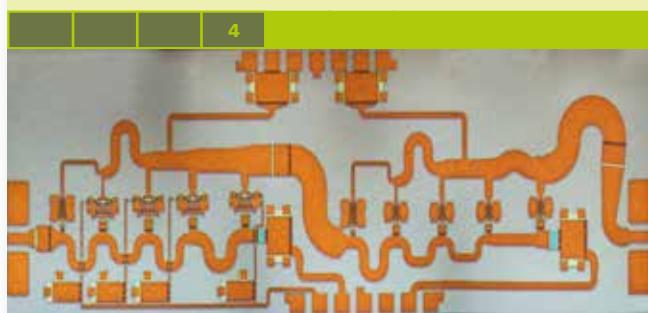
Ka-BAND POWER AMPLIFIERS BASED ON GALLIUM NITRIDE

PHILIPPE DENNLER
TEL. +49 761 5159-273
PHILIPPE.DENNLER@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – GaN POWER AMPLIFIER

- OPERATIONAL FREQUENCY: UP TO 40 GHz
- OUTPUT POWER: 9 W AT 30 GHz
- EFFICIENCY: 25 % AT 30 GHz
- GAIN: 20 dB AT 30 GHz

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Simulated (dotted lines) and measured (solid lines) large signal characteristics of the dual-stage non-uniform distributed power amplifier versus frequency at $P_{in} = 20 \text{ dBm}$ ($V_{DS} = 15 \text{ V}$, $I_{D,DC} = 300 \text{ mA/mm}$).

Simulierte (gepunktete Linien) und gemessenes (durchgezogene Linien) Großsignalverhalten des zweistufigen Dual-Gate-NDPA über der Frequenz bei $P_{in} = 20 \text{ dBm}$ ($V_{DS} = 15 \text{ V}$, $I_{D,DC} = 300 \text{ mA/mm}$).

Motivated by the emerging demand for narrow and broadband amplifiers with operational frequencies in the Ka-band, Fraunhofer IAF has been putting effort in the development of a millimeter-wave (mm-wave) gallium nitride (GaN) technology capable of meeting the requirements of the European space, mobile communications and security industry. The institute has established a gallium nitride platform and provides circuits for Ka-band frequencies and beyond. With the development of the 100 nm GaN technology, Fraunhofer IAF was the first European player to demonstrate monolithic microwave integrated circuits operation with output powers up to 9 W at 30 GHz and more than 1 W over a multi-octave bandwidth of up to 37 GHz.

Radio frequency power generation and amplification based on solid-state devices is currently limited to power levels below 5 W for frequencies above 20 GHz; for broadband applications reaching 40 GHz, the limit lies even below 1 W. InP- and GaAs-based mm-wave power amplifiers cannot provide higher saturated output power levels, due to the scaling penalty in the break-down voltage and operating bias. However, increasing the output power per chip is essential in order to satisfy the needs of future generations of mobile communications and short range broadband surveillance radar systems. High output power enables highly linear class-A power amplifiers operating far below saturation with an appropriate back-off. High linearity is absolutely necessary to allow for high data rates using modern digital modulation schemes, e. g. 5th generation mobile communications with an envisaged user access at 27 GHz or point-to-point E-band backhaul radios.

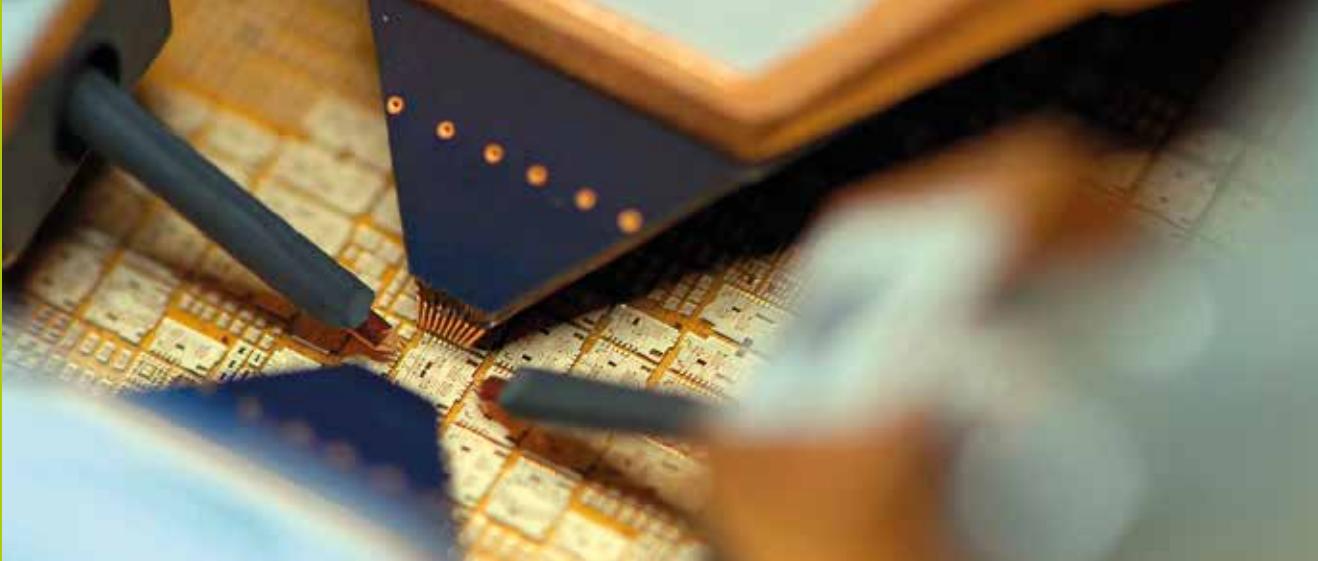
Fraunhofer IAF realized the opportunities GaN has to offer and started designing power amplifier monolithic microwave integrated circuits (MMICs) for Ka-band applications in an early stage of technology development. The technology relevant for the design of MMICs at Ka-band (26.5 – 40 GHz) is the 100 nm process. It was achieved by scaling the 250 nm process regarding gate length and results in a higher cut-off frequency f_T . With the development of the 100 nm GaN

Ka-BAND-LEISTUNGSVERSTÄRKER BASIEREND AUF GALLIUMNITRID

Die steigende Nachfrage an Schmal- und Breitband-Verstärkern mit Betriebsfrequenzen im Ka-Band hat das Fraunhofer IAF dazu bewegt, die Entwicklung der Galliumnitrid (GaN)-basierten Millimeterwellen (mmW)-Technologie voranzutreiben, um so den Anforderungen der europäischen Weltraum-, Mobilfunk- und Sicherheitsindustrie gerecht zu werden. Das Institut hat eine Galliumnitrid-Plattform geschaffen, welche Schaltungen zum Ka-Band und darüber hinaus ermöglicht. Mit der Entwicklung der 100-nm-GaN-Technologie hat das Fraunhofer IAF als erster europäischer Anbieter monolithisch integrierte Schaltkreise mit Ausgangsleistungen von bis zu 9 W bei 30 GHz, und mehr als 1 W über mehrere Oktaven bis zu 37 GHz nachgewiesen.

Die auf Halbleiterbauelementen basierte Erzeugung und Verstärkung hochfrequenter Signale für Frequenzen über 20 GHz beschränkt sich derzeit auf Leistungen unter 5 W. Für Breitband-Anwendungen bis 40 GHz liegt die Grenze sogar bei unter 1 W. Bedingt durch die niedrige Durchbruchsspannung und dem daraus resultierenden Arbeitspunkt sind mit InP- und GaAs-basierten mmW-Leistungsverstärkern keine höheren Ausgangsleistungen möglich. Um den Anforderungen künftiger Mobilfunkgenerationen und breitbandiger Nahbereichsradare gerecht zu werden, ist eine höhere Ausgangsleistung auf Chip-Ebene jedoch unerlässlich. Eine hohe Ausgangsleistung erlaubt eine Aussteuerung weit unter Sättigung und ermöglicht den Einsatz von hochlinearen Leistungsverstärkern der Klasse A. Eine hohe Linearität des Übertragungssystems ist notwendig, um hohe Datenraten unter Verwendung moderner digitaler Modulationsarten zu erzielen, wie sie z. B. im Mobilfunk der fünften Generation für den Benutzerzugang bei 27 GHz oder beim Richtfunk für den Rücktransport im E-Band vorgesehen sind.

Das Fraunhofer IAF hat das Potenzial von GaN erkannt und bereits in einem frühen Stadium der Technologieentwicklung begonnen, monolithisch integrierte Schaltungen (MMICs) für Ka-Band-Anwendungen zu entwickeln. Für den Entwurf von MMICs im Ka-Band (26,5 – 40 GHz) wird die 100-nm-GaN-Technologie eingesetzt. Diese wurde durch die Skalierung der Gate-Länge des 250-nm-Prozesses erzielt, was eine höhere Grenzfrequenz f_T zur Folge hat. Mit der Entwicklung der 100-nm-GaN-Technologie hat das Fraunhofer IAF als erster europäischer Anbieter MMICs mit der beachtlichen Ausgangsleistung von bis zu 94 GHz demonstriert. Die GaN-Technologie eröffnet somit die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit von Systemen im Ka-Band erheblich zu steigern, z. B. für Anwendungen im Bereich Mobilfunk und Rüstung. Basierend auf der durch die 250-nm-GaN-Technologie gewonnenen Erfahrung, wurde ein integrierter zweistufiger Leistungsverstärker mit einer Ausgangsleistung von 4,5 W und einer Effizienz (PAE) von 34 % bei 30 GHz in Mikrostreifenleitungs-Technologie (MSL) demonstriert. Die Weiterentwicklung des 100-nm-GaN-Prozesses und der damit verbundenen Schaltungs-konzepte führten zur Entwicklung eines dreistufigen Leistungsverstärker-MMIC, welcher eine Ausgangsleistung von 9 W mit 20 dB Gain und einer PAE von 25 % bei 30 GHz liefert. Diese Resultate veranschaulichen die Leistungsfähigkeit der neuen Technologie im Ka-Band. In den vergangenen Jahrzehnten wurden monolithisch aufgebaute Verstärker mit guten Eigenschaften



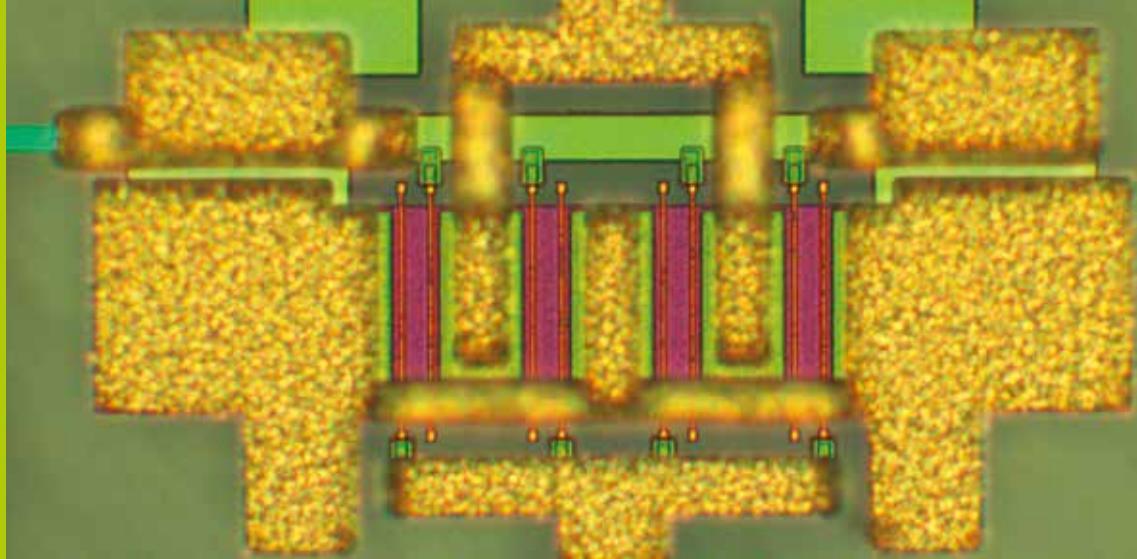
technology, Fraunhofer IAF was the first European player to demonstrate MMIC operation with considerable output power of up to at least 94 GHz. GaN technology at Ka-band frequencies thus offers possibilities for significant performance improvements, e. g. for mobile communications and defense applications. Based on the knowledge of circuit design and modeling obtained with the 250 nm GaN technology, a dual-stage power amplifier MMIC providing an output power of 4.5 W with 34 % of PAE at 30 GHz was demonstrated in microstrip line (MSL) technology.

Consistent further development of the 100 nm process and associated circuit concepts led to the development of a three-stage power amplifier MMIC. The manufactured amplifier delivers an output power of 9 W with 20 dB power gain and a PAE of 25 % at 30 GHz. These results impressively illustrate the power capability of the new technology at Ka-band. Amplifiers with good performance over extremely wide bandwidths have been successfully realized within the past two decades in monolithic technologies. Hence, broadband power amplifiers are employed in a number of modern applications. High power requirements at frequencies above the X-band are typically still satisfied with designs based on vacuum tubes. Considering that tube amplifiers such as traveling wave tubes require a high voltage power supply, typically require warm-up time, have significant aging related issues and are relatively expensive, the advantages that solid state technology offers over vacuum tube technology are significant. The demand for high power and high frequency requires transistors based on semiconductor materials with both large breakdown voltage and high electron velocity such as GaN.

Because of the increasing demand for broadband applications in the Ka-band, Fraunhofer IAF has been focusing on developing transistors and circuit concepts which take these rapidly emerging field of applications into account. Several GaN high

electron mobility transistor (HEMT) distributed amplifier MMICs using the non-uniform distributed power amplifier (NDPA) topology have been published by Fraunhofer IAF in recent years. The NDPA topology increases the maximum output power and PAE of the circuit by presenting an optimized load impedance to each of the transistor sections. Using the aforementioned 100 nm process, Fraunhofer IAF has succeeded in pushing the NDPA concept into the millimeter-wave regime. A broadband dual-stage power amplifier MMIC operating over an impressive bandwidth from 8 – 42 GHz and thus covering the X-, Ku-, and Ka-band simultaneously was demonstrated in 2012. Further developments resulted in an NDPA MMIC which employs dual-gate HEMTs in the driver stage in order to boost the gain of the amplifier. The amplifier covers a frequency range from 6 GHz to 37 GHz with an output power well beyond 1 W over the entire frequency range. At the time of publication in 2013, this was the highest output power ever achieved by a distributed amplifier at this frequency range. The impressive measured S_{21} of (17 ± 1) dB means a significant increase of 3 dB as compared to a driver stage using standard common-source HEMTs. The simulated and measured large signal characteristics versus frequency at 20 dBm input power are shown in Fig. 1. The MMIC delivers an output power of more than 30 dBm with a corresponding gain of more than 11 dB over the entire designed frequency band from 6 GHz to 37 GHz. The saturated power at a frequency of 28 GHz and at the upper band edge at 37 GHz is 32.1 dBm (1.6 W) and 31 dBm (1.3 W), respectively. A photograph of a four-finger dual-gate device, as used for the HEMTs in the driver stage of the MMIC, is shown in Fig. 3. The gate fingers have a length of 100 nm and a width of 45 μ m each.

Future development comprises further stabilization of the process and progressing towards enhanced performance in terms of power density and efficiency in order to enable applications such as 5th generation mobile communications (5G).



3

2 On-wafer probing of monolithic integrated 100 nm gallium nitride circuits.

On-Wafer-Messung von monolithisch integrierten 100-nm-Galliumnitrid-Schaltungen.

3 4 × 45 µm dual-gate high electron mobility transistor structure with DC bias resistor on the left.

4 × 45 µm Dual-Gate-HEMT-Struktur mit DC-Bias-Widerstand auf der linken Seite.

über extrem weite Bandbreiten erfolgreich realisiert. Heute finden breitbandige Verstärker in den verschiedensten militärischen und kommerziellen Anwendungen ihren Einsatz. Für hohe Leistungsanforderungen oberhalb des X-Bands werden typischerweise noch immer Vakuumröhren eingesetzt. Solche Wanderfeldröhren-Verstärker bringen jedoch Probleme wie Hochspannungserzeugung, Aufwärmzeit, Alterung und einen relativ hohen Anschaffungspreis mit sich. Gegenüber diesen Schwierigkeiten bieten Halbleiterbauelemente erhebliche Vorteile. Die Forderung nach hoher Leistung bei hoher Frequenz verlangt Transistoren, die auf Halbleitermaterialien mit großer Durchbruchsspannung und hoher Elektronengeschwindigkeit basieren, wie es bei Galliumnitrid der Fall ist.

Getrieben durch die steigende Nachfrage nach Breitbandapplikationen im Ka-Band, hat das Fraunhofer IAF ein besonderes Augenmerk auf Transistoren und Schaltungskonzepte gerichtet, die es ermöglichen, dem schnell ansteigenden Anwendungsgebiet Rechnung zu tragen. In den letzten Jahren hat das Institut verschiedene, auf dem Konzept verteilter Verstärker (NDPA) basierende, GaN-HEMT-MMICs veröffentlicht. Die NDPA-Topologie erhöht die maximale Ausgangsleistung und PAE des Schaltkreises durch das Anbieten einer optimalen Last für jeden einzelnen Transistor. Unter Verwendung des oben beschriebenen 100-nm-GaN-HEMT-Prozesses ist es dem Fraunhofer IAF gelungen, mit dem NDPA-Konzept erfolgreich in das Millimeterwellen-Regime vorzudringen. Ein breitbandiger zweistufiger Leistungsverstärker, welcher über die eindrucksvolle Bandbreite von 8 – 42 GHz funktioniert und somit X-, Ku-, und Ka-Band gleichzeitig abdeckt, wurde 2012 vorgestellt. Die Weiterentwicklung resultierte in einem NDPA-MMIC, welcher Dual-Gate-HEMTs in der Treiberstufe verwendet und so die Verstärkung der Schaltung erhöht. Der Verstärker deckt einen Frequenzbereich von 6 – 37 GHz ab und liefert eine Ausgangsleistung von weit über 1 W über das gesamte Band. Zur Zeit der Veröffentlichung im Jahr 2013 war dies die höchste, durch einen verteilten Verstärker je erreichte Ausgangsleistung im gegebenen Frequenzbereich. Das gemessene S_{21} von (17 ± 1) dB bedeutet eine erhebliche Verbesserung um 3 dB im Vergleich zu einer Treiberstufe mit Transistoren in Source-Schaltung. Das simulierte und gemessene Großsignalverhalten über der Frequenz bei einer Eingangsleistung von 20 dBm ist in Abb. 1 gezeigt. Der MMIC liefert eine Ausgangsleistung von über 30 dBm mit einer zugehörigen Verstärkung von über 11 dB über das gesamte Frequenzband von 6 GHz bis 37 GHz. Die Sättigungsleistung beträgt 32,1 dBm (1,6 W) bei 28 GHz und 31 dBm (1,3 W) an der oberen Bandkante bei 37 GHz. Der Dual-Gate-Transistor mit vier Fingern, wie er in der Treiberstufe des MMIC eingesetzt wurde, ist in Abb. 3 gezeigt. Die Gate-Finger haben je eine Länge von 100 nm und eine Breite von 45 µm.

Die zukünftige Entwicklung beinhaltet die weitere Stabilisierung des Prozesses und Fortschritte in Richtung Leistungsdichte und Effizienz, um Anwendungen wie den Mobilfunk der fünften Generation (5G) zu ermöglichen.

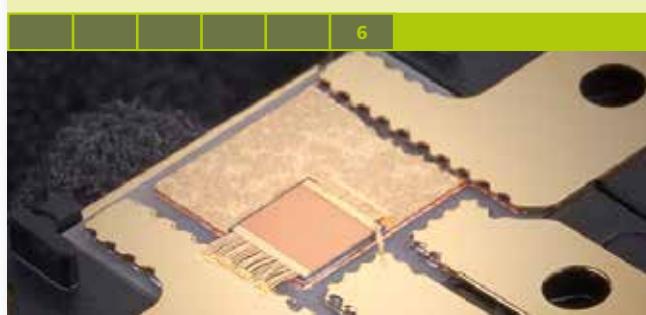
FAST AND EFFICIENT POWER SWITCHING WITH GALLIUM NITRIDE ON SILICON

RICHARD REINER
TEL. +49 761 5159-552
RICHARD.REINER@IAF.FRAUNHOFER.DE

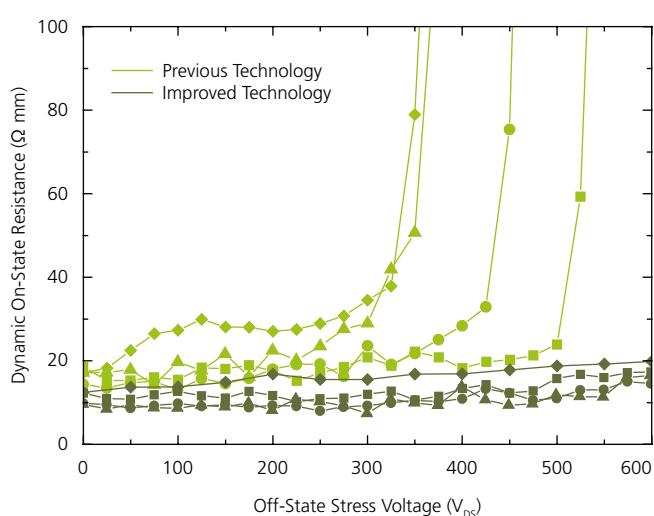
SPOT ON – GaN POWER CONVERTER

- OUTPUT POWER: 1000 W
- EFFICIENCY: > 97 %
- SWITCHING RATE: 120 V/ns
- OPERATIONAL FREQUENCY: 100 kHz

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



Gallium nitride based power devices on silicon substrate enable a new generation of power electronic applications. Using advanced epitaxial GaN-buffer concepts, Fraunhofer IAF achieved a vertical breakdown voltage of more than 800 V. This enables the fabrication of large gate width devices in the 600 V class with on-state currents of up to 100 A and on-resistances as low as 50 mΩ. Fraunhofer IAF's GaN-HEMTs power modules demonstrate a fast switching performance and high efficiency. Measurements show a high switching slew rate of up to 120 V/ns and a high efficiency of more than 97 % at an output power of 1 kW and a frequency operation of 1 MHz respectively.



1 Characterization of the dynamic on-state resistance as a function of the off-state drain-source voltage measured at off-state stress periods of ■ 2 µs, ● 50 µs, ▲ 1 ms and ◆ 10 s.

Charakterisierung des dynamischen Durchlasswiderstands als Funktion der Sperrspannung, aufgetragen für Sperrzeiten von ■ 2 µs, ● 50 µs, ▲ 1 ms und ◆ 10 s.

The development and use of new semiconductor materials such as gallium nitride (GaN) leads to breakthroughs in power electronics. The outstanding physical properties of this material allow an efficient operation at high voltages, high currents, high frequencies and high junction temperatures. In contrast to other high performance semiconductors such as silicon carbide or diamond, GaN can be grown and processed on inexpensive, large-area silicon substrates. These capabilities permit the reduction of weight, volume and costs of power electronic circuits. Thus, the GaN technology has a great impact on power electronics in a wide range of applications such as automotive, aviation, energy conversion and lighting.

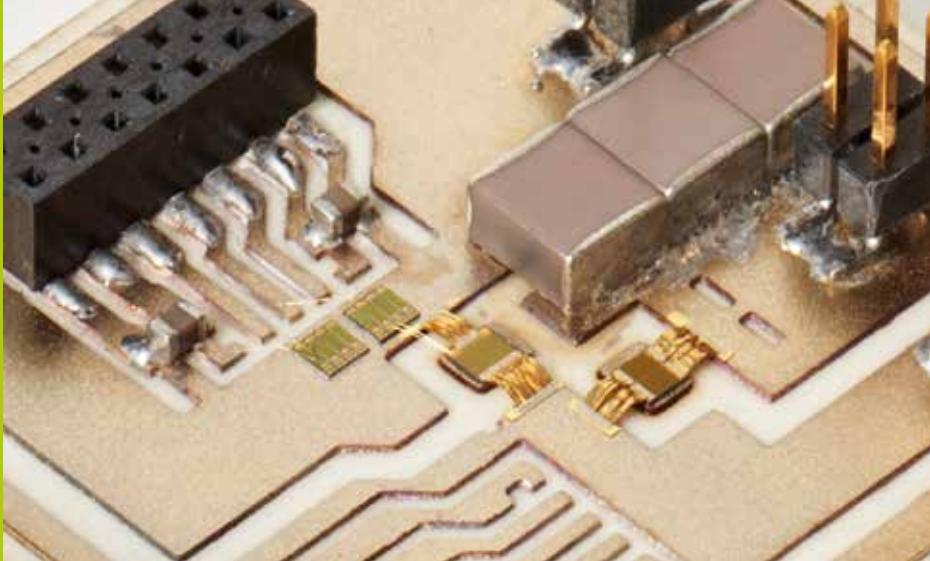
Fraunhofer IAF demonstrates a high competence in the development of GaN-based power devices. In the previous year, remarkable progress has been achieved, driven by our cooperation with Infineon Technologies, as well as in the project »GaNPV« funded by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety and the initial, market-oriented Fraunhofer project »HILL«. In 2014, a consortium of twelve partners under the leadership of Fraunhofer IAF started the project »ZuGaNG« funded by the Federal Ministry of Education and Research.

SCHNELLES UND EFFIZIENTES SCHALTEN DURCH GALLIUMNITRID AUF SILIZIUM

Galliumnitrid-Bauelemente auf Silizium-Substraten ermöglichen eine neue Generation von Anwendungen in der Leistungselektronik. Mithilfe fortschrittlicher Konzepte für GaN-basierte Pufferschichten konnte das Fraunhofer IAF eine vertikale Spannungsfestigkeit von mehr als 800 V erzielen. Dies ermöglicht die Fertigung von Leistungstransistoren mit sehr großen Gateweiten für die 600-V-Klasse, mit Durchlassströmen von bis zu 100 A und Durchlasswiderständen von unter 50 mΩ. An Leistungsmodulen mit GaN-HEMTs des Fraunhofer IAF konnte ein schnelles Schaltverhalten und eine hohe Effizienz demonstriert werden. Messungen zeigen steile Schaltflanken von bis zu 120 V/ns und eine Wandlereffizienz von über 97 %, bei einer Ausgangsleistung von 1 kW und einer Schaltfrequenz von 1 MHz.

Neue Halbleitermaterialien wie Galliumnitrid (GaN) verhelfen der Leistungselektronik zu einem weiteren Entwicklungssprung. Die herausragenden physikalischen Eigenschaften des Materials erlauben effizientes Schalten bei hohen Spannungen, Strömen, Frequenzen und Temperaturen. Im Vergleich zu anderen Leistungshalbleitern, wie Siliziumcarbid oder Diamant, kann GaN auf kostengünstigen und großflächigen Silizium-Substraten gewachsen werden. Diese Besonderheit ermöglicht die Entwicklung einer kompakten, leichten und kostengünstigen Leistungselektronik. Damit beeinflusst die GaN-Technologie eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche der Leistungselektronik, wie beispielsweise die Automobilbranche, die Luftfahrt, die Energiebranche oder die Beleuchtungsindustrie. Das Fraunhofer IAF kann eine hohe Kompetenz bei der Entwicklung von GaN-basierter Leistungselektronik vorweisen. Durch eine Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Infineon Technologies und durch öffentlich geförderte Projekte konnten im vergangenen Jahr deutliche Fortschritte erzielt werden. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit fördert die Entwicklung von monolithisch integrierten Halbbrücken im Projekt »GaNPV«. Großflächige Bauelemente werden im Fraunhofer Projekt »HILL« entwickelt. Darüber hinaus führt das Fraunhofer IAF seit diesem Jahr ein Konsortium von 12 Partnern im Projekt »ZuGaNG« an. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt.

Die Entwicklung hochisolierender GaN-Epitaxie-Schichten ist maßgebend für die Hochspannungstechnologie. Ziel ist die Erhöhung der Sperrspannung und der Isolation durch das Wachstum dickerer GaN-Zwischenschichten. Zusätzlich wird die strukturelle Qualität des Kristallwachstums verbessert, um die Ausbeute von funktionierenden Bauelementen zu erhöhen. Die Entwicklung spannungsarmer Zwischenschichten mit hoher Dicke wurde durch zwei Konzepte vorangetrieben. Mit einer Schichtdicke von 4,8 µm konnte eine »Graded-Lattice«-Struktur gewachsen werden. Dadurch wurde eine vertikale Durchbruchsspannung von 650 V erreicht. »Super-Lattice«-Strukturen wurden bis zu einer Dicke von 5,8 µm gewachsen. Mit dieser Strukturdicke wurde eine vertikale Durchbruchsspannung von über 800 V erreicht.



2

The development of high resistive epitaxial GaN-buffer layers on Si-substrates is fundamental for a high voltage technology. The aim is to increase the breakdown voltage and the isolation by growing higher GaN-buffer thicknesses. In addition, crystal quality has to be improved to achieve high yield of functional devices per wafer. In order to obtain a high buffer thickness without cracks and low tensile strain two advanced concepts were explored. A graded- and a super-lattice layer structure concept was realized. With the graded-lattice structure a vertical breakdown voltage of more than 650 V was achieved as a result of a thickness of 4.8 μm , of more than 800 V due to a thickness of 5.8 μm using the super-lattice structure.

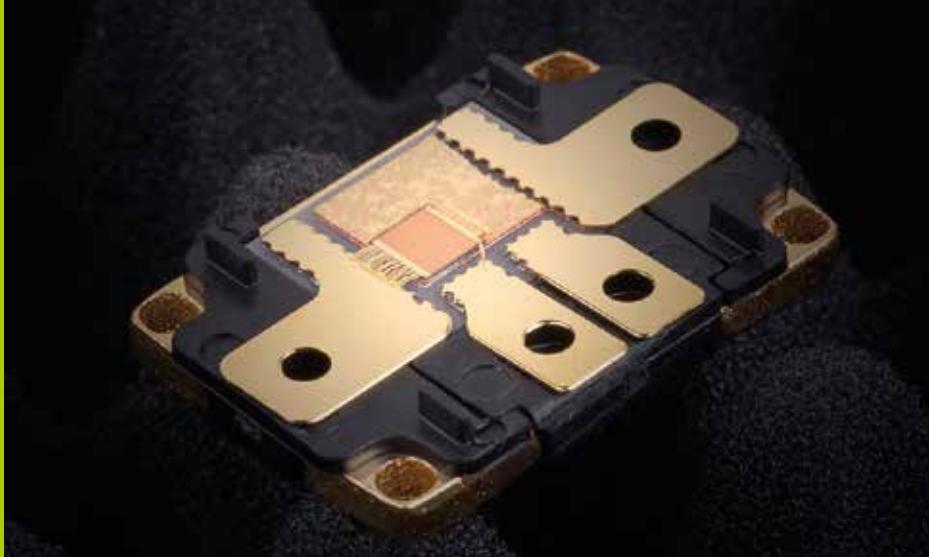
High power converters require efficient, large-size GaN devices in order to get high on-state currents and low on-state resistances. Such devices rely on a sophisticated epitaxy and processing technology with low leakage current and low defect density. Fraunhofer IAF develops and fabricates large GaN on Si power transistors with high gate widths of up to 367 mm. The devices withstand an off-state voltage of more than 600 V, and a corresponding drain and gate leakage current with less than 5 $\mu\text{A}/\text{mm}$. In the on-state, the devices achieve high currents of up to 100 A. Furthermore, on-state resistances as low as 50 m Ω at a corresponding on-state current of 30 A could be measured.

A new generation of semiconductor devices also needs a new generation of packaging to keep the bare chip performance and to enable the best interface conditions to peripheral devices. The assembly has to manage high currents, high voltages, high temperatures and high frequencies. Fraunhofer IAF uses a suitable wide band gap package for the devices (Fig. 3) and direct bonded copper (DBC) power boards for hybrid assemblies to achieve the highest wide band gap performance.

One of the main aims in international GaN technology research is the characterization and elimination of the effect of dynamic on-state resistance, which lead to higher power losses. High electric fields in the off-state can charge defects in the transistor structure. These charged defects constrain the electron flow through the channel in the on-state. This undesired effect is observed by measuring the on-state resistance a few microseconds after a high off-state voltage stress. During the last year, Fraunhofer IAF has reduced the effect of dynamic on-state degradation significantly by improving the device layout, epitaxy and technology. Measurement shows a dynamic on-state resistance which is nearly independent of the off-state stress voltage (Fig. 1).

For the measurement of very fast switching slopes, Fraunhofer IAF developed a hybrid assembly board, which consists of a GaN-HEMT with a gate width of 90 mm, a GaN Schottky diode with a gate width of 50 mm and a hybrid driver with GaN and Si components (Fig. 2). Thus, very high switching speeds in double pulse measurements could be obtained. In the experiment, the off-state voltage was in the range of 300 V and the on-state current at 7 A. Under these conditions, IAF has achieved a turn-on slew rate of more than 50 V/ns and a very fast turn-off slew rate of more than 120 V/ns.

Furthermore, a new evaluation boost converter proves the switching performance and the efficiency of the GaN-HEMTs. With this setup, the GaN-HEMT can be characterized in an environment that is close to application and the different peripheral devices, such as different load or driver conditions, can be evaluated. A GaN power transistor with a gate width of more than 200 mm was tested in the demonstrator. This boost converter has achieved an output power of $P_{\text{out}} = 200 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 1 \text{ kW}$. The converter achieves a high efficiency of 98.7 % at a switching frequency of 100 kHz. With the same setup, the device was switched at 1 MHz with an efficiency of 97.1 %. Compared to a state-of-the-art Si power device, the converter losses were reduced by a factor of 1.6.



3

2 GaN power module for fast-switching voltage converters.

GaN-Leistungsmodul für schnell-schaltende Spannungswandler.

3 GaN-on-Si HEMT with a gate width of 367 mm. The chip is packaged in an X-6 APEI wide band gap package.

GaN-on-Si-HEMT mit einer Gateweite von 367 mm. Der Chip ist in einem X-6-APEI-Gehäuse aufgebaut.

Hochleistungswandler benötigen großflächige Bauelemente mit großen Durchlassströmen und kleinen Durchlasswiderständen. Solche Bauelemente erfordern eine ausgereifte Epitaxie und Prozesstechnologie mit kleinen Leckströmen und kleiner Defektdichte. Das Fraunhofer IAF entwickelt hierfür Leistungsbauelemente mit Gateweiten von bis zu 367 mm. Die Leistungsschalter sperren Spannungen von mehr als 600 V mit Leckströmen unter 5 μ A/mm. Im Durchlassbetrieb werden Maximalströme von 100 A erreicht. Der Durchlasswiderstand beträgt dabei 50 m Ω bei einem Strom von 30 A. Eine neue Generation von Leistungsbauelementen benötigt auch eine neue Gehäusetechnologie. Dabei ist die Schnittstelle zu peripheren Komponenten entscheidend. Eine Herausforderung ist die Anbindung von hohen Strömen, Spannungen, Temperaturen und Frequenzen bei kleiner Chipfläche. Am Fraunhofer IAF kommt die entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik zum Einsatz. Die Bauelemente werden in Hochleistungsgehäusen (Abb. 3) und »Direct Bonded Copper«-Leistungsmodulen gehäust.

Ein Hauptziel der internationalen GaN-Forschung ist die Charakterisierung und die Eliminierung eines erhöhten dynamischen Durchlasswiderstands. Durch hohe elektrische Felder im Sperrzustand können sich an Störstellen in der HEMT-Struktur ungewollte Ladungen bilden. Diese Ladungen können den Stromfluss im Kanal während des Durchlassbetriebs hemmen. Der negative Effekt zeigt sich als erhöhter Widerstand wenige Mikrosekunden nach dem Einschalten aus einer hohen Sperrspannung. Im letzten Jahr konnte der erhöhte dynamische Widerstand durch Verbesserungen des HEMT-Layouts, der Epitaxie und der Technologie signifikant reduziert werden. Messergebnisse zeigen, dass in der aktuellen Technologie die Sperrspannungsabhängigkeit des Durchlasswiderstands fast vollständig eliminiert wurde (Abb. 1).

Zur Demonstration von sehr schnellen Schaltflanken hat das Fraunhofer IAF ein hybrides Leistungsmodul entwickelt. Das Modul enthält einen GaN-Leistungstransistor mit einer Gateweite von 90 mm, eine GaN-Schottky-Diode mit einer Kanalweite von 50 mm und eine hybride Treiberschaltung aus GaN-auf-Si-Komponenten (Abb. 2). Mit diesem Aufbau konnten in einer Doppelpulsmessung sehr schnelle Schaltflanken erzielt werden: Mit einer Sperrspannung von 300 V und einem Durchlassstrom von 7 A, wurden Einschaltflanken von mehr als 50 V/ns und äußerst schnelle Ausschaltflanken von mehr als 120 V/ns erzielt. Darüber hinaus konnten die guten Schalteigenschaften und die Effizienz der GaN-HEMTs an einem Evaluierungsboard demonstriert werden. In diesem Aufbau werden Leistungstransistoren in einer anwendungsnahe Umgebung charakterisiert. Dabei können verschiedene Treiber und Lastbedingungen untersucht werden. In diesem Aufbau wurde ein GaN-Leistungstransistor mit einer Gateweite von mehr als 200 mm getestet. Im Betrieb als Hochsetzsteller wurde eine Ausgangsleistung von $P_{out} = 200 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 1 \text{ kW}$ gewandelt. Der Spannungswandler erzielte eine Effizienz von mehr als 98,7 % bei einer Schaltfrequenz von 100 kHz. Im selben Aufbau erzielte das Bauelement bei einer Schaltfrequenz von 1 MHz eine Effizienz von 97,1 %. Im Vergleich zu einem modernen Si-Leistungstransistor konnten die Wandlerverluste um den Faktor 1,6 gesenkt werden.

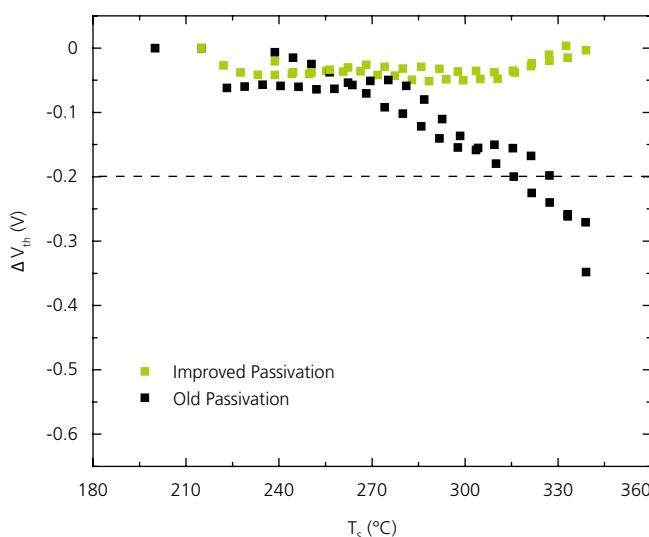
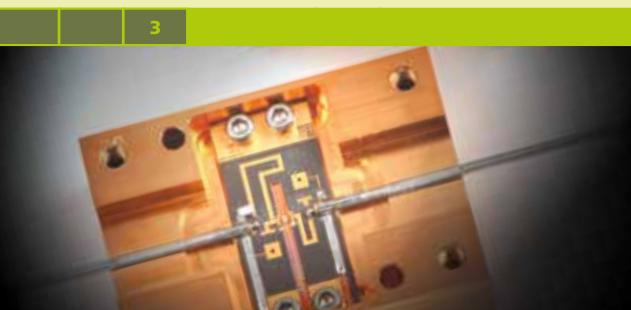
RELIABILITY OF GALLIUM NITRIDE HEMTs FOR HIGH-FREQUENCY APPLICATIONS

MICHAEL DAMMANN
TEL. +49 761 5159-517
MICHAEL.DAMMANN@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – GaN TRANSISTOR

- FREQUENCY RANGE: UP TO 100 GHz
- OUTPUT POWER AT 2 GHz: 150 W
- CRITICAL CHANNEL TEMPERATURE: 350 °C
- EXTRAPOLATED LIFE TIME: 10⁵ HOURS AT 125 °C

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Threshold voltage shift during constant current step stress test. The temperature was increased by ramping up the current from 100 mA to 600 mA in 50 mA steps. *Schwellspannungsverschiebung während eines Stromstufentests. Die Temperatur wurde durch das Hochsetzen des Stroms von 100 mA auf 600 mA in 50-mA-Schritten erhöht.*

Fraunhofer IAF has been able to increase the reliability of gallium-nitride-based »high electron mobility« transistors (HEMTs) by optimizing the passivation technology. In components with a gate length of 0.25 µm, the critical channel temperature at which degradation of the threshold voltage begins could be increased from 320 °C to above 350 °C. In transistors with a gate length of 0.1 µm, the dielectric strength and long-term stability were significantly improved by an optimized design.

Within the last years, high speed and high efficient circuits have been developed at Fraunhofer IAF by reducing the parasitic losses and gate lengths. In cooperation with NXP Semiconductors, Fraunhofer IAF develops GaN transistors with 0.25 µm gate length and gate and source terminated field plates for switch-mode power amplifiers for the next generation of mobile communication systems. An increase of the long term stability and voltage robustness is necessary for the realization and fabrication of future GaN transistors. As a consequence, the electrical power per chip area and the channel temperature are rising, which has a negative impact on component reliability. Therefore it is important to determine the critical temperature where device degradation sets in and its causes.

The thermal resistance and surface temperature of small packaged transistors have been measured under DC-operation using infrared microscopy (Fig. 2). The typical thermal resistance of devices with a 1.2 mm gate width which have been glued using epoxy resin for reliability investigations, is around 30 °C/W. In order to determine the critical temperature, the power bars have been mounted in test fixtures and have been stressed by current step stress tests at a base plate temperature of 200 °C and 215 °C. As shown in Fig. 1 the critical temperature has been increased from 320 °C to above 350 °C by improving the passivation technology, where the failure criterion was defined as a 200 mV negative shift in threshold voltage. The high temperature degradation is most likely caused by thermomechanical strain and the reliability improvement was achieved by stress reduction in the passi-

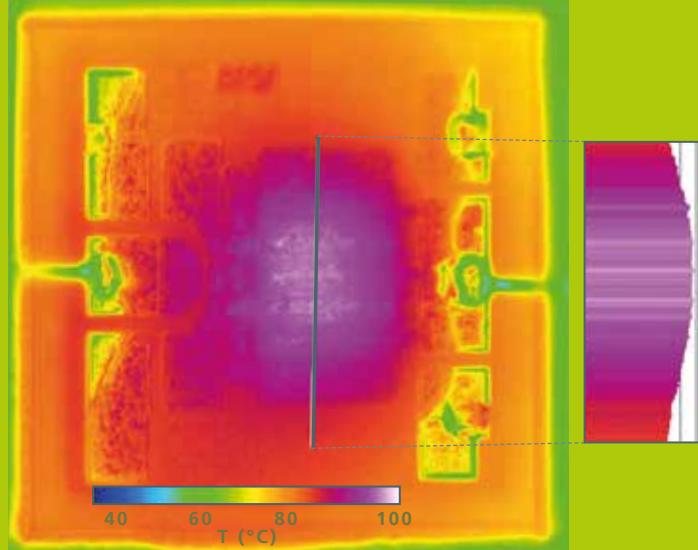
ZUVERLÄSSIGKEIT VON GALLIUMNITRID-HEMTs FÜR HOCHFREQUENZ-ANWENDUNGEN

Das Fraunhofer IAF hat die Zuverlässigkeit von Galliumnitrid-basierten »high electron mobility«-Transistoren (HEMTs) durch eine Optimierung der Passivierungstechnologie erhöhen können. Bei Bauelementen mit einer Gatelänge von 0,25 µm konnte die kritische Kanaltemperatur, bei der eine Degradation der Schwellenspannung einsetzt, von 320 °C auf über 350 °C erhöht werden. Bei Transistoren mit einer Gatelänge von 0,1 µm wurde die Spannungsfestigkeit und die Langzeitstabilität durch ein optimiertes Design maßgeblich verbessert.

In den letzten Jahren hat das Fraunhofer IAF durch eine Reduzierung der Gatelänge und durch Verkleinerung der parasitären Verluste sehr schnelle und hocheffiziente Schaltungen entwickelt. Zusammen mit NXP Semiconductors arbeitet das Fraunhofer IAF an Transistoren mit einer Gatelänge von 0,25 µm mit Gate- und Source-Feldplatten für Leistungsverstärker im Schaltbetrieb für die nächste Generation mobiler Kommunikationssysteme. Um die Realisierung und Prozessierung zukünftiger GaN-Transistoren voranzutreiben bedarf es einer Erhöhung der Langzeitstabilität und Spannungsfestigkeit. Durch die Erhöhung der elektrischen Leistung pro Chipfläche und der Kanaltemperatur verschlechtert sich jedoch die Zuverlässigkeit der Bauelemente. Deswegen muss die kritische Temperatur, bei der die Degradation einsetzt, und deren Ursache bestimmt werden.

Dazu wurden der thermische Widerstand und die Oberflächentemperatur von kleinen aufgebauten Leistungstransistoren im DC-Betrieb mittels Infrarot-Mikroskopie gemessen (Abb. 2). Der typische thermische Widerstand von Bauelementen mit 1,2 mm Gateweite beträgt ungefähr 30 °C/W. Um die kritische Temperatur zu bestimmen, wurden die Transistoren in Testfassungen eingebaut und mit einem Stromstufentest bei einer Heizplattentemperatur von 200 °C und 215 °C gealtert. Wie in Abb. 1 gezeigt, konnte die kritische Temperatur durch Verbesserung der Passivierungstechnologie von 320 °C auf über 350 °C erhöht werden, wobei das Fehlerkriterium durch eine negative Verschiebung der Schwellenspannung um 200 mV definiert wurde. Die Degradation bei hohen Temperaturen ist sehr wahrscheinlich durch thermomechanische Verformung verursacht. Die Verbesserung in der Zuverlässigkeit wurde durch eine Verkleinerung der Verspannung in der Passivierung erreicht. Zum besseren Verständnis des Degradationsmechanismus ist eine physikalische Fehleranalyse von gealterten Bauelementen durch Elektrolumineszenz und Transmissionselektronenmikroskopie geplant.

Erste beschleunigte Alterungstests wurden auch für GaN-HEMTs mit einem T-förmigen Gate und einer reduzierten Gatelänge von 0,1 µm durchgeführt. Diese Hochfrequenztransistoren sollen in Richtfunksendern und Radarsystemen zum Einsatz kommen. Um hohe Schaltfrequenzen über 75 GHz zu erreichen, muss der Zuleitungswiderstand durch Erhöhung der Aluminiumkonzentration in der Barriere reduziert werden. Außerdem muss der Abstand der Gatefeldplatte zum Kanal erhöht werden, um die parasitäre Kapazität zwischen Gate und Kanal zu verkleinern. Diese beiden Maßnahmen haben einen starken Einfluss auf die maximale



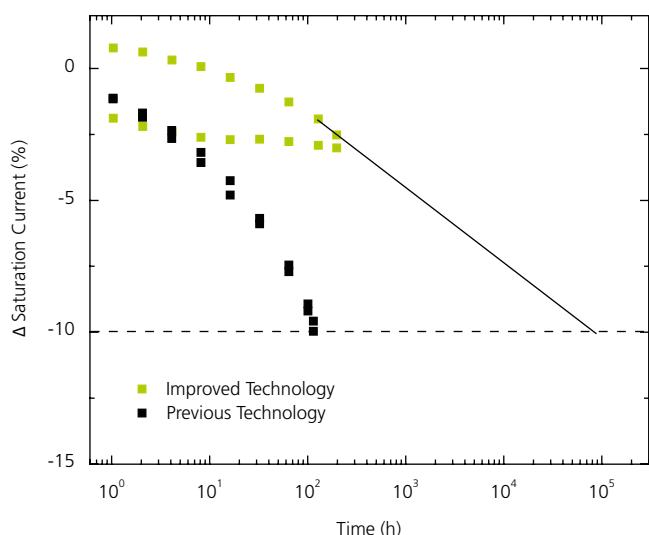
2

vation layers. Physical failure analysis of stressed devices using electroluminescence and transmission electron microscopy for a better understanding of the degradation mechanism is planned.

First accelerated stress test experiments have also been performed for the GaN HEMTs with a T-shaped gate and a reduced gate length of 0.1 μm . These high-frequency transistors are to be used in radio transmitters and radar systems. In order to achieve high switching frequencies above 75 GHz, the aluminum concentration in the barrier layer has to be increased in order to reduce the access resistance. The distance between gate field plate and channel has to be increased to reduce the parasitic capacitance between gate and channel. Both

measures have a strong impact on the electric field peak at the gate foot and, thus, on device reliability. In order to get fast feedback for technology improvement, devices are stressed on-wafer at a typical operation point of the device. Fig. 3 shows the degradation of the saturation current versus stress time at a base plate temperature of $T_{\text{bp}} = 125^\circ\text{C}$ and a drain voltage of $V_d = 15\text{ V}$.

By improving the processing technology the life time of the device has been increased from 100 h to an extrapolated life time of around 100,000 h based on a failure criterion of 10 % degradation in saturation current. It was found that the degradation is not permanent and recovers during storage at 125 $^\circ\text{C}$. This indicates that the degradation is caused by a change of charge in traps which can be further reduced by optimized fabrication technology. Long term reliability tests at different temperatures of packaged devices are planned in order to determine the activation energy and life time under operating conditions. The voltage robustness, which is important for large signal operation, was investigated using electroluminescence imaging during ramped voltage step stress tests in off-state at room temperature. During the stress, the electroluminescence in off-state, which is caused by an increase of the leakage current, increases. Some luminescent areas are caused by an increase of gate leakage whereas others indicate an increase in drain leakage current. The localized areas are also characterized by the gate voltage dependence of the light emission. The characterization and defect classification will help to improve the understanding of the degradation mechanism.



3 Relative change of saturation current during an on-wafer constant current stress test ($T_{\text{bp}} = 125^\circ\text{C}$, $V_d = 15\text{ V}$, $I_d = 300\text{ mA/mm}$).

Relative Änderung des Sättigungsstroms während eines Konstantstromtests auf Waferebene ($T_{\text{bp}} = 125^\circ\text{C}$, $V_d = 15\text{ V}$, $I_d = 300\text{ mA/mm}$).

Future work will include ongoing electroluminescence investigations of more devices and physical analysis of charged defects as well as cross section transmission electron microscopy of structural defects of the different kinds of localized defects. The aim of future investigations is to further improve reproducibility and processing technology of short channel GaN based HEMTs in terms of long term stability and voltage robustness.



4

2 Thermal microscopy image of a packaged GaN HEMT at 40 °C base plate temperature operated at 2 W DC-power.

Infrarot-Mikroskopie eines aufgebauten GaN-HEMTs, der bei 40 °C und einer DC-Leistung von 2 W betrieben wurde.

4 Set-up for on-wafer stress tests.

Messaufbau für Alterungstests auf Waferebene.

elektrische Feldstärke am Gatefuß und damit auf die Zuverlässigkeit des Transistors. Um ein schnelles Feedback zur Verbesserung der Technologie zu erreichen, werden die Bauelemente bei erhöhter Temperatur auf Waferebene unter typischen elektrischen Betriebsbedingungen gealtert. Abb. 3 zeigt die Degradation des Sättigungsstroms gegen die Alterungszeit bei einer Heizplattentemperatur von $T_{bp} = 125$ °C und einer Drainspannung von $V_d = 15$ V.

Durch Verbesserung der Prozessierungstechnologie konnte die Lebensdauer des Bauelements, die durch eine zehnprozentige Abnahme des Sättigungsstroms definiert ist, von 100 Stunden auf eine extrapolierte Lebensdauer von ungefähr 100.000 Stunden erhöht werden. Die Degradation ist nicht permanent und erholt sich durch Lagerung bei 125 °C. Dies deutet auf eine Degradation durch die Umladung von Störstellen hin, die durch eine optimierte Prozessführung weiter reduziert werden kann. Weiterhin sind Langzeittests bei unterschiedlichen Temperaturen geplant, um die Aktivierungsenergie und die Lebensdauer unter Betriebsbedingungen zu bestimmen. Die Spannungsfestigkeit, die für den Großsignalbetrieb wichtig ist, wurde mithilfe von bildgebender Elektrolumineszenz während Spannungsstufentests im abgeschalteten Zustand bei Raumtemperatur untersucht. Während der Alterung nahm die Elektrolumineszenz, die durch eine lokale Erhöhung des Leckstromes verursacht wird, zu. Einige lumineszierende Flächen werden durch eine Erhöhung des Gateleckstroms verursacht, während andere auf eine Erhöhung des Drainleckstroms hindeuten. Die lokalisierten Flächen werden zusätzlich durch ihre Gatespannungsabhängigkeit charakterisiert. Die Charakterisierung und Klassifizierung der Defekte ermöglicht es, den Degradationsmechanismus besser zu verstehen.

Zukünftige Arbeiten werden weitergehende Elektrolumineszenzuntersuchungen von Bauelementen und die physikalische Analyse von geladenen Defekten sowie die Transmissionselektronenmikroskopie von strukturellen Defekten beinhalten. Das Ziel weiterer Untersuchungen ist es, die Reproduzierbarkeit und die Prozesstechnologie der GaN-HEMTs mit kurzen Gatelängen weiter zu verbessern, um eine erhöhte Langzeitstabilität und Spannungsfestigkeit zu erreichen.

PHOTODETECTORS

MARTIN WALTHER

TEL. +49 761 5159-434

MARTIN.WALTHER@IAF.FRAUNHOFER.DE

ROBERT REHM

TEL. +49 761 5159-353

ROBERT.REHM@IAF.FRAUNHOFER.DE



PHOTODETEKTOREN



»2014 ist es uns gelungen, unsere Prozesstechnologie auf ein neues Materialsystem zu übertragen und erstmals eine voll funktionstüchtige SWIR-Kamera aufzubauen. Highlight war dann natürlich, mich selbst auch mal im SWIR zu sehen.«

Frank Rutz, der an bildgebenden Systemen für den kurzwelligen Infrarotbereich (SWIR) arbeitet.

»In 2014 we succeeded in transferring our process technology onto a new material system and in realizing a fully functional SWIR camera. Seeing myself in the SWIR was, of course, a special highlight.«

Frank Rutz, who is working on imaging systems for the short-wave infrared range (SWIR).

FOCUSING THE INVISIBLE

DAS UNSICHTBARE IM FOKUS

While the human eye can merely recognize outlines of objects in the darkness, cameras that make use of the short-wave infrared spectral range, facilitate imaging at night which exceeds the performance of the human eye or of conventional residual image intensifiers. Contrary to the visible or near-infrared spectral range, the short-wave infrared range (SWIR, 1.4 – 3 μ m wavelength range) provides a higher photon flux (»night glow«) which can be captured with a corresponding SWIR camera.

Such imaging systems support security services in nocturnal interventions or can be applied for the additional surveillance of buildings or borders. But not only in the darkness, imaging systems in the short-wave infrared range increase our visual perception, compared to what we see with just our eyes. In quality control processes, the short-wave infrared also reveals other surface characteristics than can be detected in the visual range, allowing the non-destructive identification of material defects or the quality control of food.

In 2014, we developed a first model of a InGaAs-based SWIR camera of this kind with our industrial partner AIM. Therefore, scientists at Fraunhofer IAF developed an InGaAs chip with 640 x 512 pixels and 15 μ m pixel pitch. Different to its silicon-based equivalent, which is used, for example, in mobile phone cameras, the highly sensitive technology developed at Fraunhofer IAF delivers high-contrast images even in low-light conditions.

Not only in the short-wave infrared, extended imaging capabilities help to capture the entire spectrum of objects and surroundings – also in the long-wave infrared and the ultraviolet wavelength range, interesting items beyond visibility can be detected.

- Safety and security:
 - Warning sensors for the protection of aircrafts
 - Infrared detectors for the surveillance of buildings and borders
- Quality control:
 - Highly sensitive infrared detectors for non-destructive material analysis
 - UV detectors for process control



Während das menschliche Auge im Dunkeln allenfalls noch Schemen erahnen kann, ermöglichen uns Kameras für den kurzweligen Infrarotbereich eine Bildgebung bei Nacht. Diese sind dem Auge und auch herkömmlichen Restlichtverstärkern deutlich überlegen: Denn im Gegensatz zum sichtbaren oder nah-infraroten Spektralbereich steht im kurzweligen Infrarot (»short-wave infrared«, SWIR, 1,4 – 3 μm Wellenlänge) ein höherer Photonenfluss zur Verfügung (»night glow«), der mit einer entsprechenden SWIR-Kamera erfasst werden kann.

Eine solche Bildgebung hilft Sicherheitskräften bei nächtlichen Einsätzen oder unterstützt die Gebäude- und Grenzüberwachung. Doch nicht nur im Dunkeln sehen wir mit bildgebenden Systemen im kurzweligen Infrarot mehr als mit bloßem Auge. Auch bei der Qualitätskontrolle zeigt uns das kurzwellige Infrarot andere Oberflächeneigenschaften als im Sichtbaren, sodass wir Materialdefekte zerstörungsfrei erkennen oder die Qualität von Lebensmitteln kontrollieren können.

2014 entstand in Zusammenarbeit mit der Firma AIM eine erste Indiumgalliumarsenid (InGaAs)-basierte SWIR-Kamera dieser Art. Dazu wurde am Fraunhofer IAF ein InGaAs-Chip mit 640 x 512 Bildpunkten im 15- μm -Rastermaß entwickelt. Anders als das Pendant aus Silizium, das beispielsweise auch in Handykameras eingesetzt wird, liefert die am Fraunhofer IAF entwickelte Technologie auch bei sehr lichtschwachen Szenen kontrastreiche Bilder.

Nicht nur im kurzweligen Infrarot hilft uns eine ergänzende Bildgebung, das volle Spektrum der Dinge zu erfassen – auch im mittleren oder langwelligen Infrarot sowie im ultravioletten Bereich lassen sich interessante Entdeckungen abseits des Sichtbaren machen:

- Sicherheit und Schutz:
 - Warnsysteme für den Schutz von Flugzeugen
 - Infrarot-Detektoren für die Überwachung von Gebäuden und Grenzen
- Qualitätskontrolle:
 - Hochsensitive Infrarot-Detektoren zur zerstörungsfreien Materialanalyse
 - UV-Detektoren zur Prozesskontrolle

RADIATION-HARD UV DETECTORS

SUSANNE KOPTA

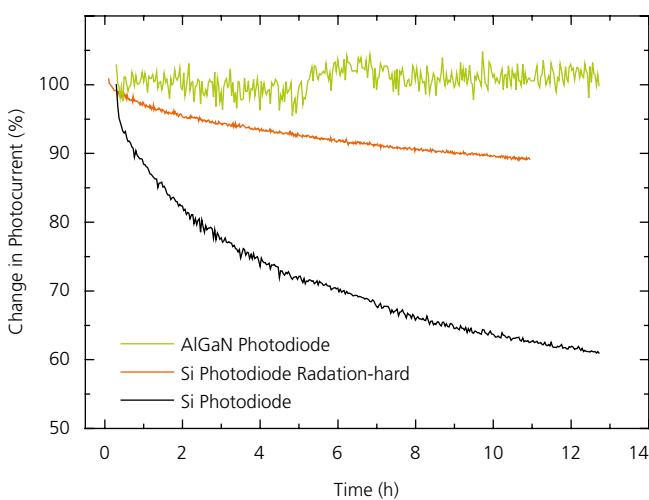
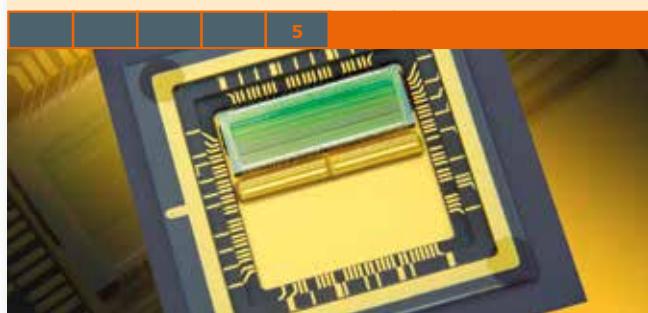
TEL. +49 761 5159-538

SUSANNE.KOPTA@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – UV DETECTORS

- WAVELENGTH REGION: < 400 nm
- LONG-TERM STABILITY: > 1000 h
- RESPONSITIVITY UP TO 0.2 A/W
- RESPONSITIVITY AT 13 nm: 13 mA/W

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 *Relative change of the photocurrent signal of an AlGaN-based diode and two Si photodiodes. While the signal of the AlGaN UV-detector remains constant, both Si diodes exhibit a significant decrease in sensitivity.*

Relative Änderung des Photostrom-Signals einer AlGaN-basierten und zweier Si-Photodioden. Während das Signal des AlGaN-UV-Detektors konstant bleibt, zeigen beide Si-Dioden einen deutlichen Abfall der Empfindlichkeit.

Photodiodes based on the semiconductor material aluminum gallium nitride have been developed and tested with intense ultraviolet and extreme ultraviolet light sources. They show excellent radiation hardness compared to regular silicon photodiodes and are intrinsically insensitive to visible and infrared radiation. Thus, they are suitable for monitoring high-power UV light sources for industrial applications, such as UV curing, water treatment or EUV lithography.

During a three year project funded by Fraunhofer, detectors for ultraviolet (UV) light based on the semiconductor material aluminum gallium nitride (AlGaN) were developed at Fraunhofer IAF and tested for various applications. UV detectors made of AlGaN have significant advantages over conventional silicon (Si) photodiodes: they are insensitive to visible and infrared radiation without any external filter and they show no degradation under UV irradiation. By means of Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, p-i-n layer structures were grown on sapphire substrates. The Al content determines the cut-off wavelength of the sensitive spectral region: it is 365 nm for binary gallium nitride and decreases almost linearly with the addition of aluminum, down to 210 nm for pure aluminum nitride. By adding a small amount of indium to obtain InGaN layers, the cut-off wavelength can be extended up to 400 nm. Filter layers can be integrated into the semiconductor chip by heteroepitaxial growth, allowing narrow-band UV detection. The epitaxially fabricated layers were subsequently processed into p-i-n photodiodes and mounted into TO cans. UV detectors with various cut-off wavelengths ranging from UV-A to UV-C were obtained, with or without filters for the short-wavelength region (Fig. 2).

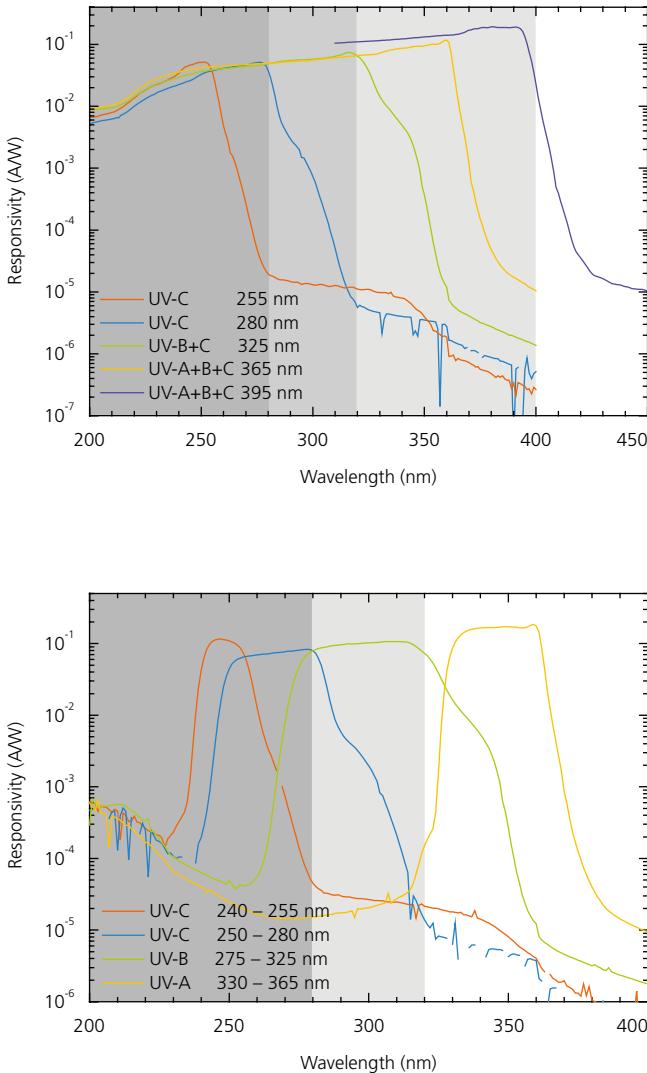
To compare the degradation behaviour of Si photodiodes with AlGaN-based UV detectors, they were exposed to the intense radiation of a low-pressure amalgam mercury lamp with dominant emission lines at 254 nm and 185 nm. Two versions of Si diodes were employed, a conventional one and a diode with improved radiation hardness for monitoring of excimer lasers at 193 nm. Both Si photodiodes show a significant signal

STRAHLUNGSBESTÄNDIGE UV-DETEKTOREN

Photodioden aus dem Halbleitermaterial Aluminiumgalliumnitrid zeigen bei der Bestrahlung mit intensiven Lichtquellen im ultravioletten und extrem-ultravioletten Spektralbereich eine exzellente Strahlungshärte im Vergleich zu üblichen Silizium-Photodioden. Außerdem sind sie intrinsisch unempfindlich gegenüber sichtbarer und infraroter Strahlung. Somit eignen sie sich für die Überwachung von Hochleistungs-UV-Lichtquellen, beispielsweise in industriellen Anwendungen wie der UV-Härtung, Wasseraufbereitung oder EUV-Lithographie.

Im Rahmen eines dreijährigen Fraunhofer-internen Projekts wurden am Fraunhofer IAF basierend auf dem Halbleitermaterial Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) Detektoren für ultraviolettes (UV) Licht entwickelt und für verschiedene Anwendungen getestet. UV-Detektoren aus AlGaN zeigen entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen Photodioden aus Silizium (Si): Sie sind ohne externe Filter unempfindlich gegenüber sichtbarem sowie infrarotem Licht und sie zeigen keine Degradation bei Bestrahlung mit UV-Licht. Für die Herstellung von UV-Detektoren aus AlGaN werden mittels Metallorganischer Gasphasen-Epitaxie (engl. Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) p-i-n-Schichtstrukturen auf Saphir-Substraten gewachsen. Der Aluminiumgehalt der intrinsischen Schicht bestimmt die cut-off-Wellenlänge des empfindlichen Spektralbereichs: Sie beträgt 365 nm für binäres Galliumnitrid und nimmt mit der Zugabe von Aluminium nahezu linear bis hin zu 210 nm für reines Aluminiumnitrid ab. Indem ein geringer Anteil Indium zugesetzt wird, erhält man InGaN-Schichten und kann die Grenzwellenlänge bis zu 400 nm verschieben. Filterschichten können in den Halbleiterchip über hetero-epitaktisches Wachstum integriert werden und ermöglichen so eine schmalbandige UV-Detektion. Die epitaktisch hergestellten Schichten werden anschließend zu p-i-n-Photodioden prozessiert und in TO-Gehäuse aufgebaut. Mit diesem Verfahren wurden UV-Detektoren mit unterschiedlichen Grenzwellenlängen vom UV-A- bis in den UV-C-Bereich, mit und ohne Filter für den kurzweligen Bereich, erzielt (Abb. 2).

Um das Degradationsverhalten von Si-Photodioden mit dem von AlGaN-basierten UV-Detektoren zu vergleichen, wurden sie der intensiven Bestrahlung einer Niederdruck-Amalgam-Quecksilberlampe mit den vorherrschenden Wellenlängen von 254 nm und 185 nm ausgesetzt. Dabei wurden zwei Varianten der Si-Dioden verwendet: eine konventionelle und eine Diode mit erhöhter Strahlungsstabilität für die Überwachung von Excimer-Lasern bei 193 nm. Beide Si-Dioden zeigen einen deutlichen Signal-Abfall während der Dauer der Bestrahlung, während das Signal des AlGaN-basierten Detektors über die gleiche Zeit konstant bleibt. Wie zu erwarten war, ist der Signal-Abfall der konventionellen Si-Diode stärker als der Abfall der strahlungsbeständigen Diode (Abb. 1). Auch bei Langzeittests mit einer Eisen-dotierten Quecksilber-Dampflampe, die eine UV-Leistung von 5 W/cm² liefert, wurde für die AlGaN-basierten UV-Detektoren bei einer Bestrahlung von 1000 h keine Abnahme des Photostromsignals beobachtet. Beide Messungen wurden am Fraunhofer IFAM durchgeführt, wobei die Kappen der TO-Gehäuse entfernt wurden.



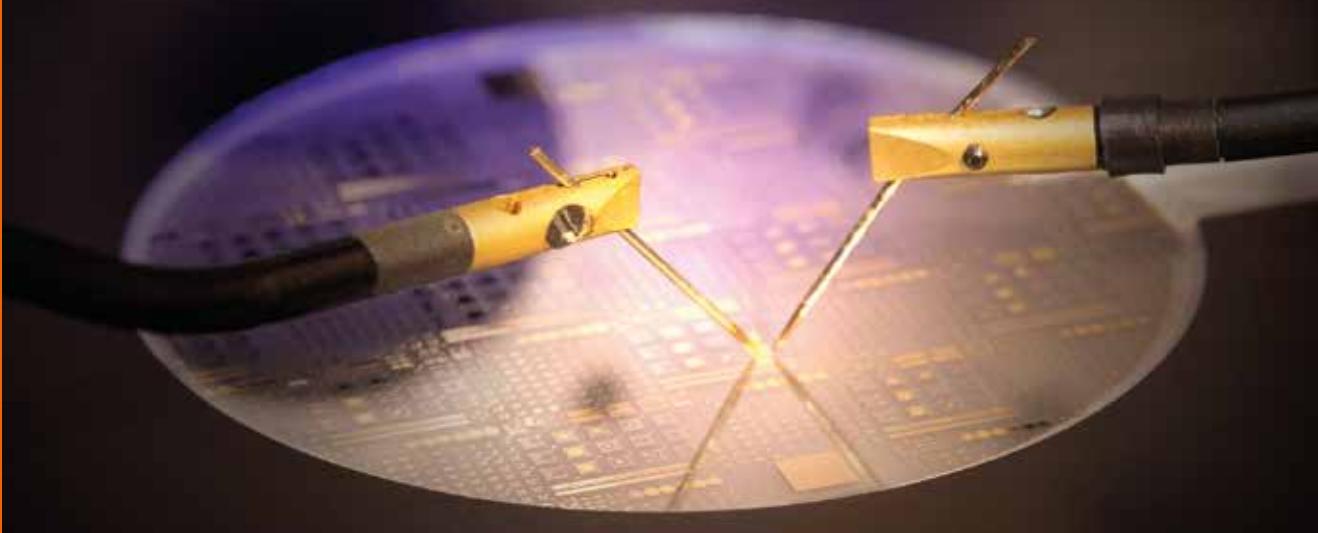
2 Spectral response of AlGaN-based UV detectors with various cut-off wavelengths (top) and with additional filters for narrow-band detection (bottom).

Spektral-aufgelöste Responsivität von AlGaN-basierten UV-Detektoren mit diversen Grenzwellenlängen (oben) und mit zusätzlicher Filterschicht für schmalbandige Detektion (unten).

decrease during illumination while the AlGaN-based detector shows a constant signal over the same period of time. As expected, the signal decrease of the conventional Si diode is larger than the decrease of the diode with higher radiation hardness (Fig. 1). Long-term testing was carried out with an iron-doped mercury pressure lamp providing a UV power of 5 W/cm^2 . No degradation of the photocurrent signal was observed for the AlGaN-based UV detector over 1000 h of irradiation. Both measurements were performed at Fraunhofer IFAM with the window cap of the TO removed.

Another potential application is the detection of extreme ultraviolet (EUV) radiation. Currently, light with a wavelength of 193 nm is used for commercial UV lithography, but sources for 13.5 nm EUV lithography are already available. At Fraunhofer ILT, the response of an AlGaN-diode was compared to a fast Si reference diode under illumination with 13.5 nm radiation. The AlGaN diode matches the fast response of the Si diode and the difference in signal amplitude is well correlated with the difference in illuminated detector area. From comparative measurements with a Si diode with known responsivity at 13.5 nm, a value of approximately 13 mA/W can be deduced for the AlGaN-based detector, which is comparable to results published for GaN-based Schottky diodes. This value can still be improved by reducing the thickness of the top contact layer.

Long-term testing under 13.5 nm EUV exposure has been published by other groups for GaN Schottky diodes, showing no degradation under pulsed irradiation, in contrast to Si diodes. Based on the experiments conducted at Fraunhofer IAF, a significant radiation hardness also for AlGaN-based p-i-n diodes can be expected. They have also shown sufficient responsivity compared to Si diodes and superior radiation hardness in the UV and EUV range to be suitable for monitoring of high power UV light sources in industrial applications.



3

3 Photo-current measurement

on AlGaN-based UV detectors.

The p-i-n diode is illuminated via a mirror with monochromatic UV light, while the electrical signal is collected through the needles.

Photostrom-Messung an AlGaN-basierten UV-Detektoren. Die über Nadeln kontaktierte Diode wird über einen Spiegel mit monochromatischem UV-Licht beleuchtet.

Eine weitere potenzielle Anwendung der UV-Detektoren ist die Detektion von extrem-ultravioletter (EUV) Strahlung. Aktuell wird Licht mit einer Wellenlänge von 193 nm für kommerzielle UV-Lithographie verwendet, wobei auch schon Lichtquellen mit einer Wellenlänge von 13,5 nm für EUV-Lithographie verfügbar sind. Am Fraunhofer ILT wurde in einem Versuch das Antwortsignal einer AlGaN-Diode bei Beleuchtung mit Strahlung der Wellenlänge 13,5 nm verglichen mit dem Antwortsignal einer schnellen Si-Referenz-Diode. Die AlGaN-Diode liefert eine vergleichbar schnelle Antwort wie die Si-Diode. Der Unterschied in der Signalhöhe entspricht etwa dem Unterschied der beleuchteten Detektor-Fläche. Anhand von Vergleichsmessungen mit einer Si-Diode mit bekannter Responsivität bei 13,5 nm kann für den AlGaN-basierten Detektor eine Responsivität von etwa 13 mA/W abgeleitet werden. Dies ist vergleichbar mit Werten, die für GaN-basierte Schottky-Dioden veröffentlicht worden sind. Dieser Wert kann noch weiter verbessert werden, indem die Dicke der oberen Kontaktsschicht verringert wird.

Langzeittests, bei denen GaN-Schottky-Dioden einer EUV-Strahlung bei 13,5 nm ausgesetzt waren, wurden von anderen Forschergruppen durchgeföhrten und zeigten keine Degradation unter gepulster Beleuchtung – dagegen erwiesen sich Si-Dioden als weniger strahlungsbeständig. Aufgrund der am Fraunhofer IAF durchgeföhrten Experimente mit einem gepulst betriebenen Excimer-Laser bei 193 nm ist auch für AlGaN-basierte p-i-n-Dioden eine hohe Strahlungsbeständigkeit zu erwarten.

AlGaN-basierte p-i-n-Dioden haben im Vergleich zu Si-Dioden eine ausreichende Responsivität bei überlegener Strahlungsbeständigkeit im UV- und EUV-Bereich gezeigt, sodass sie für die Überwachung von Hochleistungs-UV-Lichtquellen geeignet sind, die zum Beispiel bei der UV-Härtung, der Oberflächenmodifikation oder bei EUV-Lithographie zum Einsatz kommen.

LIMITING MECHANISMS IN InAs/GaSb SUPERLATTICE INFRARED PHOTODIODES

ROBERT REHM

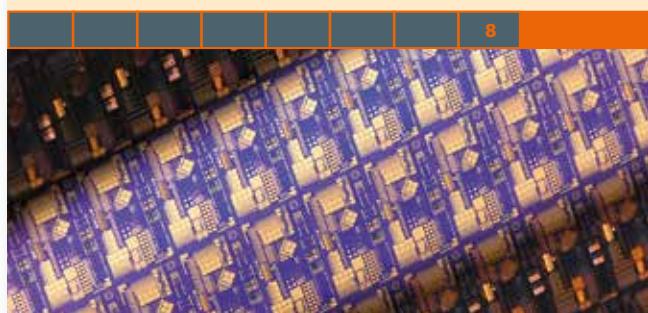
TEL. +49 761 5159-353

ROBERT.REHM@IAF.FRAUNHOFER.DE

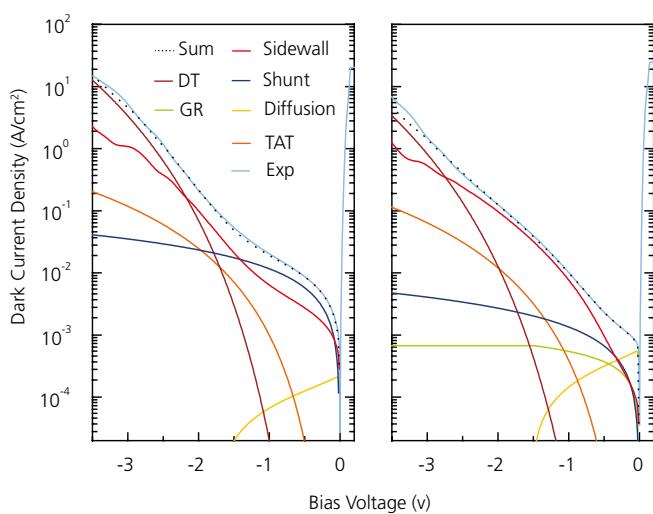
SPOT ON – InAs/GaSb PHOTODIODES

- WAVE LENGTH REGION: 8 – 12 μ m
- DIFFUSION-LIMITED BEHAVIOUR
- GENERATION-RECOMBINATION-LIFETIME AT 77 K: UP TO 230 ns
- BACKGROUND DOPING: 10^{15} cm^{-3}

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



8



1 Dark current analysis of two LWIR InAs/GaSb superlattice homojunction photodiodes at 77 K grown on MBE #1 (left) and MBE #2 (right). MBE #1: $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 85 \Omega \text{cm}^2$, $\tau_n = 25.0 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = \text{n.a.}$; MBE #2: $N_a = 9.4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 734 \Omega \text{cm}^2$, $\tau_n = 5.5 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = 229.6$. Dunkelstromanalyse zweier LWIR-InAs/GaSb-Übergitterdioden bei 77 K mit Homoübergang, gewachsen auf MBE #1 (links) und MBE #2 (rechts). MBE #1: $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 85 \Omega \text{cm}^2$, $\tau_n = 25,0 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = \text{n.a.}$; MBE #2: $N_a = 9,4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $R_{shunt}A = 734 \Omega \text{cm}^2$, $\tau_n = 5,5 \text{ ns}$, $\tau_{GR} = 229,6$.

The growth of InAs/GaSb superlattice infrared detector technology into a major competitor of established materials like CdHgTe and InSb is continuing. Getting ahead requires improvement of the electrooptical performance of the bulk material. To optimize the growth process and to fine tune the device concepts, an in-depth understanding of limiting physical mechanisms in InAs/GaSb superlattice devices is essential. Fraunhofer IAF has established a characterization technique that allows to accurately determine various mechanisms contributing to the dark current and thus to the noise in the detectors.

Within the last decade, Fraunhofer IAF has advanced its type-II InAs/GaSb superlattice (T2SL) infrared (IR) detector technology from lab demonstration to first commercial applications. In particular, the dual-color focal plane array (FPA) detectors with bi-spectral sensitivity in the mid-wavelength IR atmospheric window (MWIR, 3 – 5 μ m) are at the forefront of missile-warning sensors for airborne platforms today. Fraunhofer IAF also develops T2SLs for the long-wavelength regime (LWIR, 8 – 12 μ m). A first-class crystal quality of the bulk is the basis of competitive IR-FPAs. In-depth understanding of limiting physical mechanisms and a detailed assessment of parameter modifications during molecular beam epitaxial growth is vital to continuously improve the electrooptical performance of the bulk material.

Most important for a precise evaluation is the accurate fitting of sophisticated dark current models to experimental data. The dark current density J_D of T2SL mesa devices is generally comprised of two components, i. e., the bulk and the sidewall contributions. In the literature, the sidewall component has so far been neglected in dark current analysis. This may lead to misconceptions about limiting contributions. Therefore, the first step in the analysis is to determine the sidewall current per unit length by measuring a large number of mesa devices with variable perimeter-to-area ratio P/A. Provided that the density of macroscopic defects is reasonably low and the sidewall behavior is uniform, J_D will cluster at the accumulation point of every particular size class of mesa detectors. The

LIMITIERENDE MECHANISMEN IN InAs/GaSb-ÜBERGITTER-INFRAROT-PHOTODIODEN

Die Entwicklung von Infrarot-Detektoren auf Basis von InAs/GaSb-Übergittern als Hauptkonkurrent zu etablierten Materialien wie CdHgTe oder InSb setzt sich fort. Um einen Vorsprung herauszuarbeiten ist die konstante Verbesserung der elektrooptischen Eigenschaften des Volumenmaterials erforderlich. Der Schlüssel zur Optimierung des Wachstumsprozesses und Feinabstimmung des Bauelementkonzepts liegt im detaillierten Verständnis der limitierenden physikalischen Mechanismen in InAs/GaSb-Übergittern. Das Fraunhofer IAF hat eine Charakterisierungsmethode etabliert, die es erlaubt, verschiedene Mechanismen präzise zu bestimmen, die zum Dunkelstrom und damit zum Rauschen in diesen Detektoren beitragen. Die Befunde weichen von in der Literatur vorherrschenden Erklärungsansätzen ab.

Im vergangenen Jahrzehnt wurde am Fraunhofer IAF die Infrarot (IR)-Detektortechnologie auf Basis von Typ-II InAs/GaSb-Übergittern (T2SL) vom Stadium der Labordemonstration hin zu ersten kommerziellen Anwendungen vorangetrieben. Insbesondere Dual-Color-Detektormatrizen (FPAs) mit bi-spektraler Empfindlichkeit im atmosphärischen Transmissionsfenster des mittleren Infrarot (MWIR, 3 – 5 μ m) sind heute bereits führend im Bereich der Raketen-Warnsensorik für Flugzeuge. Um den hohen Stand der Technik von CdHgTe zu übertreffen, entwickelt das Fraunhofer IAF auch T2SL-basierte Alternativen für das langwellige Regime (LWIR, 8 – 12 μ m). Eine hervorragende Volumenkristallqualität ist die Grundlage für wettbewerbsfähige T2SL-IR-FPAs. Ein tiefes Verständnis der limitierenden physikalischen Mechanismen und eine detaillierte Bewertung von Parametermodifikationen während der Molekularstrahlepitaxie ist entscheidend für die kontinuierliche Verbesserung der elektrooptischen Leistungsfähigkeit des Volumenmaterials.

Wichtig für eine präzise Bewertung ist die Anpassung hochentwickelter Dunkelstrommodelle an experimentelle Messdaten von Mesa-geätzten T2SL-Photodioden. Die Dunkelstromdichte J_D eines T2SL-Mesabaulements setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem Volumen- und dem Seitenwandanteil. In der Literatur wurde der Seitenwandanteil für die Analyse von Dunkelströmen bislang vernachlässigt. Dies kann zu Fehleinschätzungen der limitierenden Strombeiträge führen. Daher besteht der erste Schritt der Analyse in der Bestimmung des Seitenwandstroms pro Einheitslänge, indem eine große Zahl von Mesas mit variiertem Umfang-zu-Flächen-Verhältnis P/A gemessen wird. Wenn die Dichte makroskopischer Defekte klein und das Seitenwandverhalten homogen ist, zeigt die Verteilung der J_D -Werte für jede Größenklasse von Mesas einen Häufungspunkt. Trägt man diese Häufungspunkte gegen P/A auf, kann der Seitenwandstrom pro Einheitslänge aus der Geradensteigung bestimmt werden.

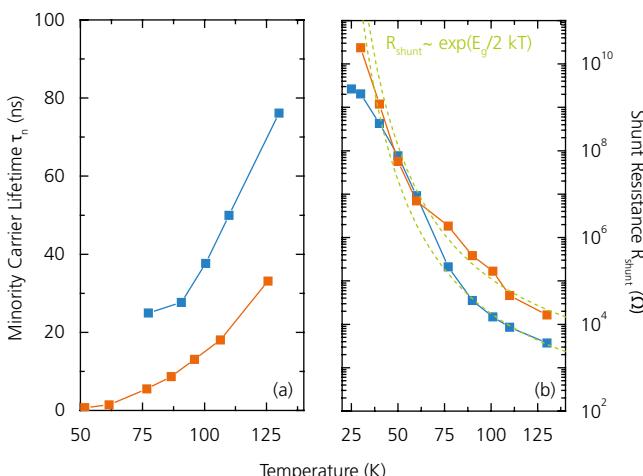
Sobald der Seitenwandstrom extrahiert wurde, kann der Volumenbeitrag durch Subtraktion des Seitenwandanteils von den gemessenen Daten bestimmt werden. Die Volumendunkelstromdichte setzt sich aus fünf Einzelbeiträgen zusammen. Die fundamentale Diffusionskomponente besteht vorwiegend aus thermisch generierten Minoritätselektronen aus der dicken, p-dotierten

sidewall current per unit length can now be determined from the slope of a plot of these accumulation points versus P/A.

Once the sidewall current has been determined, the bulk contribution is accessible by subtracting the sidewall current from the measured data. Five mechanisms jointly generate the bulk dark current density. The fundamental diffusion component is mainly comprised of thermally generated minority electrons from the thick p-type absorber region of the diode, since a very low vertical hole mobility and high donor doping result in a negligible minority hole contribution from the thin n-side. The magnitude of the diffusion current is largely determined by the minority carrier lifetime τ_n and the acceptor doping N_a , i. e. the background doping. The diffusion model takes into account the finite width of the neutral regions in relation to the minority carrier diffusion length. Consequently, the diffusion current decreases with increasing reverse bias. The generation-recombination (GR) current occurs via trap states in the space charge region (SCR) and is generally assumed to be the limiting mechanism in T2SL devices. The magnitude of

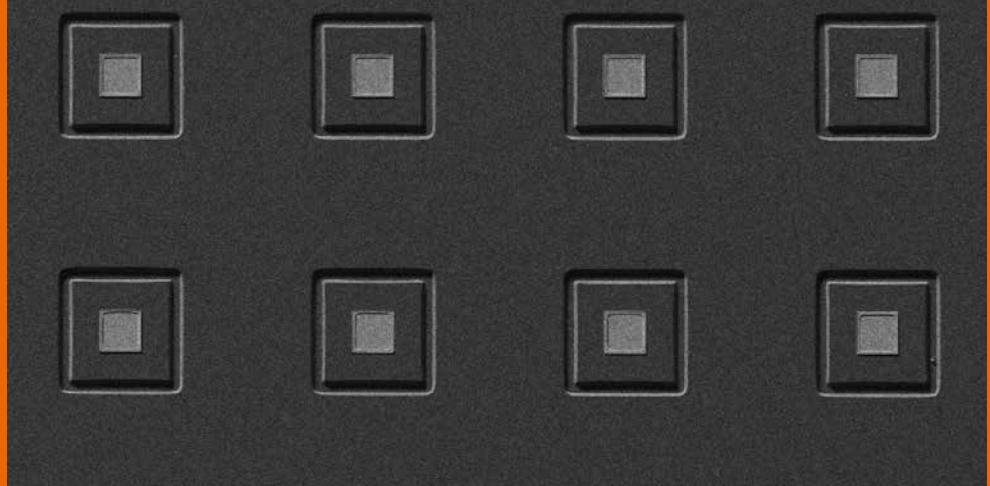
the GR current is affected by the corresponding trap level that is assumed at half the band gap, the width w of the SCR and the minority carrier lifetime τ_{GR} in the SCR. Since w is strongly affected, it is necessary to quantify N_a before fitting the GR component in the low reverse bias regime. By taking account of the series resistance of the device, N_a can be obtained from the direct band-to-band tunneling (DT) component at high reverse bias. The second tunneling component, i. e. trap-assisted tunneling (TAT), is of relevance at medium reverse bias and allows determination of the corresponding trap density. The fifth bulk mechanism, that is generally assumed to be caused by defects like threading dislocations is the ohmic shunt component.

Fig. 1 shows the dark current analysis at 77 K of two LWIR-T2SL homojunction photodiode wafers grown on different MBE machines. The light blue line represents the experimentally measured dark current density and the black dotted line is the sum of the various fitted components. The models can be fitted to the experimental data over a wide bias range. Obviously, the sidewall contribution constitutes a major part of the total dark current. The bulk material from MBE #1 is limited by the shunt mechanism. No GR current is required to explain the experimental data. In contrast, the bulk material from MBE #2 shows an order of magnitude higher shunt resistance and is limited by a low diffusion lifetime instead. On both systems, GR-limited behavior around 77 K cannot be observed. Fig. 2 compares τ_n and the shunt resistance versus temperature for both systems. A first empirical analysis suggests that the shunt resistance scales with the band gap and the temperature in the same way as the GR component. This might be the underlying reason why concepts that have proven successful for GR reduction are also helpful to reduce shunt contributions.



2 Comparison of the minority carrier lifetime and the shunt resistance extracted for MBE #1 (blue) and MBE #2 (orange).
Vergleich der Minoritätsladungsträger-Lebensdauer und des Shunt-Widerstands von MBE #1 (blau) und MBE #2 (orange).

In conclusion, a detailed analysis will eventually lead to optimized, low dark current T2SL IR-FPAs enabling higher operating temperatures and the use of optics with larger f-numbers.



3

3 Scanning electron microscope image of test diodes for dark current characterization.
Rasterlektronenmikroskop-Aufnahme von Testdioden zur Dunkelstromcharakterisierung.

Absorberregion der Diode, da die geringe vertikale Mobilität der Löcher und die hohe Donatorkonzentration zu einem vernachlässigbaren Beitrag der Minoritätslöcher von der n-Seite führen. Die Höhe des Diffusionsstroms ist hauptsächlich bestimmt durch die Minoritätsladungsträger-Lebensdauer τ_n und die Akzeptordotierung N_a , welche in unseren Teststrukturen der Hintergrunddotierung entspricht. Das verwendete Diffusionsmodell berücksichtigt die in Relation zur Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger endliche Länge der neutralen Bahngebiete. Entsprechend nimmt der Diffusionsstrom mit zunehmender Rückwärtsspannung ab. Der Generations-Rekombinationsstrom (GR) nutzt Störstellen in der Raumladungszone (SCR) und wird allgemein als der limitierende Mechanismus in T2SL-Dioden erachtet. Die Höhe des GR-Stroms wird durch die Lage der zugehörigen Störstelle bestimmt, welche in der Mitte der Bandlücke anzunehmen ist. Weiterhin bestimmen die Breite w der SCR und die Minoritätsladungsträgerlebensdauer τ_{GR} in der SCR den GR-Strom. Da die geringe Hintergrunddotierung w beeinflusst, ist es erforderlich, zunächst N_a zu bestimmen, bevor die GR-Komponente durch Modellanpassung bei kleiner Rückwärtsspannung extrahiert werden kann. Berücksichtigt man den Serienwiderstand des Bauelements, kann N_a aus dem direkten Band-zu-Band-Tunneln bei hoher Rückwärtsspannung gewonnen werden. Die zweite Tunnelkomponente, das Störstellen-assistierte Tunneln, ist wichtig bei mittlerer Rückwärtsspannung und erlaubt die Bestimmung der zugehörige Störstellendichte. Eine ohmsche Shunt-Komponente stellt den fünften Mechanismus dar, welcher im Volumen von T2SL-Photodioden auftreten kann. Allgemein wird angenommen, dass durchstoßende Versetzungen und andere Defekte hierfür ursächlich sind.

Abb. 1 zeigt die Dunkelstromanalyse zweier LWIR-T2SL-Wafer mit Homoübergang bei 77 K, die auf unterschiedlichen MBE-Anlagen gewachsen wurden. Die hellblauen Linien zeigen die gemessenen Dunkelstromdichten und die schwarz gepunkteten Linien stellen die Summe der fünf angepassten Teilbeiträge dar. Die Modelle lassen sich über einen breiten Spannungsbereich an die experimentellen Daten anpassen. Offenbar stellt der Seitenwandanteil einen Hauptbeitrag zum Gesamtdunkelstrom dar. Das Volumenmaterial von MBE #1 ist durch den Shunt-Mechanismus limitiert. Zur Erklärung der experimentellen Daten ist kein GR-Anteil erforderlich. Dagegen zeigt das Volumenmaterial von MBE #2 einen um eine Größenordnung höheren Shunt-Widerstand und ist stattdessen durch eine geringe Diffusionslebensdauer limitiert. Für beide Anlagen wird um 77 K keine GR-Limitierung beobachtet. Abb. 2 vergleicht die Temperaturabhängigkeit der Minoritätsladungsträger-Lebensdauer τ_n und des Shunt-Widerstands für beide Anlagen. Eine erste empirische Analyse legt nahe, dass der Shunt-Widerstand mit der Bandlücke und der Temperatur in der gleichen Weise skaliert wie die GR-Komponente. Darin könnte begründet sein, dass Konzepte, die zur GR-Reduktion erfolgreich sind, auch den Shunt-Anteil reduzieren können. Eine detaillierte Leistungsanalyse wird schließlich zu optimierten T2SL-IR-FPAs mit reduziertem Dunkelstrom führen. Diese werden es ermöglichen, künftig höhere Betriebstemperaturen und Optiken mit größerer F-Zahl einzusetzen.

EXCESS NOISE IN InAs/GaSb SUPERLATTICES

ANDREAS WÖRL

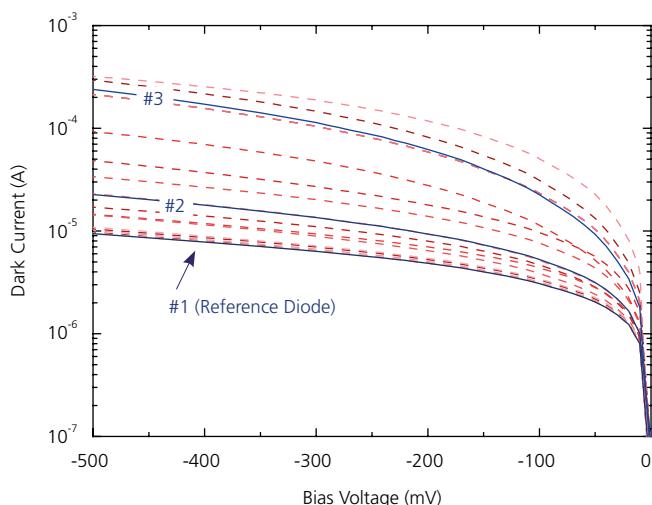
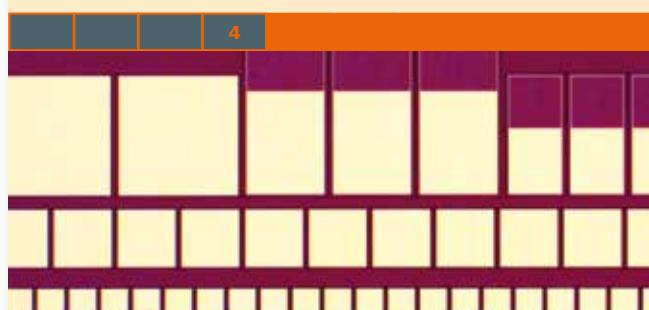
TEL. +49 761 5159-461

ANDREAS.WOERL@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – NOISE PROPERTIES

- ANALYSIS OF WHITE NOISE IN InAs/GaSb SUPERLATTICE INFRARED PHOTODIODES
- PROOF OF VALUE OF MCINTYRE'S MODEL
- AVALANCHE PROCESSES AS THE ROOT CAUSE OF EXCESS NOISE

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Dark current for a set of 21 LWIR InAs/GaSb superlattice photodiodes at 77 K. The bulk dark current found in this material is exemplified by the reference diode #1. The photodiodes #2 and #3 are typical examples for photodiodes with increased dark current.

Dunkelstrom von 21 LWIR InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden bei 77 K. Der Dunkelstrom des Volumenmaterials ist durch die Referenzdiode #1 veranschaulicht. Die Photodioden #2 und #3 sind typische Beispiele für Dioden mit erhöhtem Dunkelstrom.

The signal-to-noise ratio is the most important figure of merit of InAs/GaSb superlattice infrared photodetectors. Nevertheless, these photodetectors' noise properties are not very well understood. Fraunhofer IAF is thus investigating the low-frequency white-noise behavior of a larger set of InAs/GaSb superlattice infrared photodiodes. In contrast to the commonly used shot-noise model, McIntyre's excess-noise model describes the experimentally observed noise quite well over a wide range of reverse bias voltage, frequency and dark current. Avalanche multiplication processes within high electric field domains localized around macroscopic defects apparently lead to increased dark current and excess noise.

To improve the signal-to-noise ratio of InAs/GaSb superlattice (SL) infrared (IR) photodetectors, a thicker photon absorption layer can be grown which maximizes the signal. Due to the large diffusion length of minority carriers in this material system, not only electrons generated within the space-charge region, but also electrons generated along the absorber region contribute to the resulting photocurrent signal. The shot-noise model is commonly used to correlate dark current with noise.

For the investigation of noise properties Fraunhofer IAF developed a low-noise measurement setup, using an automated switching unit to investigate large sets of mid-wave infrared (MWIR, 3 – 5 μ m) and long-wave infrared (LWIR, 8 – 12 μ m) p-i-n photodiode (PD) devices at 77 K, which allows to measure noise currents down to the femtoampere range. For these studies, dielectrically passivated mesa devices with a size of 400 x 400 μ m² (Fig. 3) were used instead of array-sized devices with a sidewall length between 15 μ m and 40 μ m. The bulk material for both is limited by Shockley-Read-Hall processes within the space-charge region. Analyzing the dependence of the total dark current density versus the perimeter-to-area ratio of devices with varying mesa sizes shows that the total current density in large diodes is dominated by bulk currents instead of sidewall currents. In both sets of large area devices, the distribution of reverse bias dark current showed a significant spread over three orders of magnitude. In particular

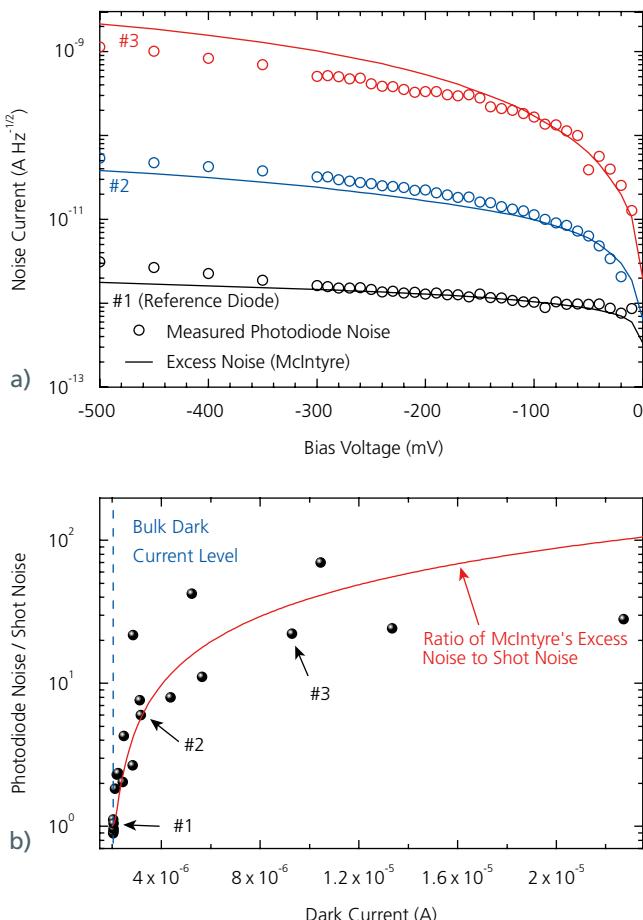
ZUSATZSTROMRAUSCHEN VON InAs/GaSb-ÜBERGITTERN

Die wichtigste Eigenschaft von InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodetektoren ist ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das Verhalten des Stromrauschen dieser Photodetektoren ist dennoch nicht ausreichend erforscht. Deshalb wurde am Fraunhofer IAF das niederfrequente, weiße Rauschen einer größeren Anzahl von InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodioden untersucht. Das Rauschmodell von McIntyre beschreibt das experimentell gewonnene Stromrauschen über einen weiten Spannungs-, Frequenz- und Dunkelstrombereich sehr gut – im Gegensatz zu dem gemeinhin verwendeten Schrotrauschenmodell. Es zeigt, dass der erhöhte Dunkelstrom und das zusätzliche Stromrauschen durch Lawinenverstärkungsprozesse in Bereichen hoher Feldstärken ausgelöst werden, die um makroskopische Gitterdefekte ausgebildet sind.

Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis von InAs/GaSb-Übergitter-Infrarot-Photodetektoren zu erhöhen, kann eine dickere Absorptionsschicht gewachsen werden. Das Signal kann demnach maximiert werden, da aufgrund der großen Diffusionslänge von Minoritätsladungsträgern in diesem Materialsystem nicht nur Elektronen zum resultierenden Photostromsignal beitragen, die in der Raumladungszone generiert werden, sondern auch Elektronen, die in der Absorptionsschicht generiert werden. Für gewöhnlich wird das Schrotrauschenmodell herangezogen, um den Dunkelstrom mit dem Stromrauschen zu verknüpfen. Um das generelle Verhalten des Stromrauschen zu erforschen, muss eine große Anzahl an Photodioden untersucht werden.

Das Fraunhofer IAF hat einen rauscharmen, automatisierten Messaufbau inklusive einer Schaltmatrix entwickelt, mit dem bei 77 K Photodioden untersucht werden, die sensitiv sind für Infrarotstrahlung des mittleren (MWIR, 3 – 5 μm) und des langen (LWIR, 8 – 12 μm) Wellenlängenbereichs. Dadurch ist es möglich, das Stromrauschen bis in den Femtoamperebereich aufzulösen. Anstelle von typischen kleinflächigen Dioden der Detektormatrizen mit Kantenlängen zwischen 15 μm und 40 μm wurden für diese Studien dielektrisch passivierte Dioden mit einer Fläche von 400 x 400 μm^2 verwendet (Abb. 3). Das Volumenmaterial der MWIR- und LWIR-Detektoren ist durch Shockley-Read-Hall-Prozesse innerhalb der Raumladungszone dominiert. In großflächigen Dioden wird die Gesamtdunkelstromdichte vom Volumenstrom dominiert, nicht von Oberflächenströmen. Dies wird durch die Analyse der Abhängigkeit der Gesamtdunkelstromdichte vom Umfang-zu-Flächen-Verhältnis mit Dioden unterschiedlich großer Flächen deutlich. Die Verteilung des Dunkelstroms bei Rückwärtsspannung zeigt in den Messreihen mit großflächigen Dioden eine signifikante Spanne über drei Größenordnungen hinweg. Weiterhin zeigt sich besonders für die MWIR-Dioden, dass nur wenige großflächige Dioden überhaupt die Dunkelstromdichte des Volumenmaterials erreichen, welche an kleinflächigen Referenzdioden auf selbigen Wafers gemessen wurde. Dieses Dunkelstromverhalten von großflächigen Dioden wird makroskopischen Defekten mit typischen Distanzen von wenigen hundert Mikrometern zugeschrieben. Anhand von 21 LWIR-Dioden wurde die große Streuung des Dunkelstroms von großflächigen Dioden untersucht (Abb. 1).

regarding the MWIR diodes, few large-sized diodes achieved a dark current density close to the dark current level of the bulk as measured on small-sized reference diodes on the same wafer. This behavior of large sized diodes is attributed

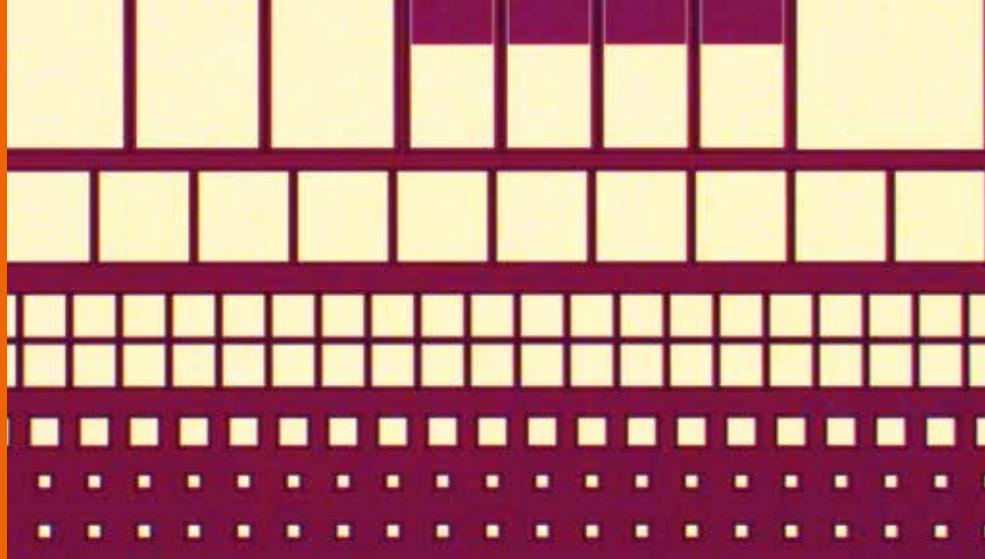


2 (a) White-noise current of the exemplified LWIR photodiodes #1 to #3 at 77 K which are marked in Fig. 1 and 2b. (b) Ratio of measured photodiode noise at 77 K and 50 mV reverse bias voltage to shot-noise for a set of 21 LWIR InAs/GaSb superlattice photodiodes.

(a) Weißes Stromrauschen der exemplarischen LWIR-Photodioden #1 bis #3 aus Abb. 1 und 2b bei 77 K. (b) Verhältnis des gemessenen Stromrauschens bei 77 K und 50 mV Rückwärtsspannung zum Schrottrauschen der 21 LWIR InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden.

to the presence of macroscopic defects with typical distances of a few hundred microns. To investigate the large spread in dark current on large diodes, a set of samples with 21 LWIR diodes has been analyzed (Fig. 1). The noise properties in the white part of the noise spectrum at 1500 – 1600 Hz under -50 mV reverse bias voltage were measured at 77 K. At this bias voltage, the plotted diodes do not show a 1/f-noise behavior in this frequency range. The shot-noise expression only explains the noise of devices with a dark current close to bulk level. An increasing deviation of the observed noise from the expected shot-noise is found for increasing dark current. Instead, the well-known excess-noise model developed by McIntyre (IEEE Trans. Electron Devices 13, 164, 1966) could be adapted over a wide range of reverse bias voltage to fit the general behavior of the entire data set for both sets of devices (Fig. 2a). McIntyre's model for electron injection into the high-field domain is used, while the ratio of device dark current to reference bulk dark current for the experimentally defined multiplication factor M is implemented in McIntyre's model.

For MWIR and LWIR devices, a different k -ratio relating the hole and electron ionization coefficients is used to explain experimental data (MWIR: $k = 0$, LWIR: $k = 100$). Fig. 2b compares the ratio of experimentally observed PD noise to shot-noise for 21 LWIR diodes in dependence of the dark current at -50 mV reverse bias voltage. If diodes with increased dark current obeyed the common shot-noise model, there should be a ratio equal to one, independent of dark current. However, the ratio generally increases with dark current. The excess-noise model evidently reproduces the general trend of the experimentally observed noise data rather well. Tentatively, the presence of high electric field domains around sites of macroscopic defects gives rise to white excess-noise in InAs/GaSb SL PDs. McIntyre's excess-noise model thus successfully translates the dark current distribution of a larger set of devices into noise distribution in the white part of the spectrum. For the calculation of the signal-to-noise ratio based on dark current measurements, McIntyre's excess-noise model is hence much better suited than the widely used shot-noise expression.



3

3 A single cleaved mesa-processed chip containing different types and sizes of test diodes.

Vereinzelte Mesa-prozessierte Teststrukturen mit Dioden unterschiedlichen Typs und Größen.

Das Stromrauschen im weißen Teil des Rauschspektrums wurde zwischen 1500 – 1600 Hz bei 50 mV Rückwärtsspannung und einer Temperatur von 77 K ausgewertet. Bei dieser Spannung und in diesem Frequenzbereich zeigen die Dioden kein 1/f-Rauschen. Das dazu gemeinhin verwendete Schrotrauschenmodell erklärt das Stromrauschen von Dioden mit Dunkelströmen nahe dem Niveau des Volumenmaterials. Das experimentell beobachtete Stromrauschen weicht mit steigendem Dunkelstrom immer stärker von dem erwarteten Schrotrauschen der Dioden ab. Dagegen kann das bekannte Modell für zusätzliches Stromrauschen, entworfen von McIntyre (IEEE Trans. Electron Devices 13, 164, 1966) für Lawinendioden, adaptiert werden. Es entspricht über einen weiten Rückwärtsspannungsbereich dem generellen Verhalten des gesamten Datensatzes beider Wellenlängenbereiche (Abb. 2a). Dabei wurde das Modell von McIntyre für in die Hochfelldomäne induzierte Elektronen gewählt. Das Verhältnis vom Diodendunkelstrom zum Referenzdunkelstrom des Volumenmaterials wurde als experimentell bestimmter Multiplikationsfaktor M in das Modell von McIntyre implementiert.

Um die experimentellen Daten nachzuvollziehen, wurden unterschiedliche Werte für das Verhältnis des Löcher-zu-Elektronenionisationskoeffizienten für die MWIR- und LWIR-Dioden ermittelt (MWIR: $k = 0$, LWIR: $k = 100$). Abb. 2b zeigt das Verhältnis des experimentell beobachteten Photodiodenstromrauschen zum Schrotrauschen der 21 LWIR-Dioden, aufgetragen über den Dunkelstrom bei 50 mV Rückwärtsspannung. Würden die Dioden mit erhöhtem Dunkelstrom dem gewöhnlichen Schrotrauschen folgen, müsste sich unabhängig vom Dunkelstrom ein Verhältnis von eins einstellen. Das Verhältnis steigt hingegen mit zunehmendem Dunkelstrom. Das Modell für zusätzliches Stromrauschen spiegelt den generellen Verlauf der experimentellen Stromrauschendaten offensichtlich besser wider.

Bereiche hoher Feldstärken, die um makroskopische Defekte ausgebildet sind, begründen anscheinend das zusätzliche weiße Stromrauschen von InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden. Es ist bemerkenswert, dass mit dem Modell von McIntyre für zusätzliches Stromrauschen die Verteilung des Dunkelstroms einer größeren Anzahl von Dioden erfolgreich in eine Stromrauschverteilung im weißen Teil des Spektrums umgerechnet werden kann. Demzufolge ist für die Berechnung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses aus Dunkelstrommessungen das Modell von McIntyre für zusätzliches Stromrauschen adäquater als das ansonsten verbreitete Schrotrauschenmodell.

SEMICONDUCTOR LASERS

JOACHIM WAGNER

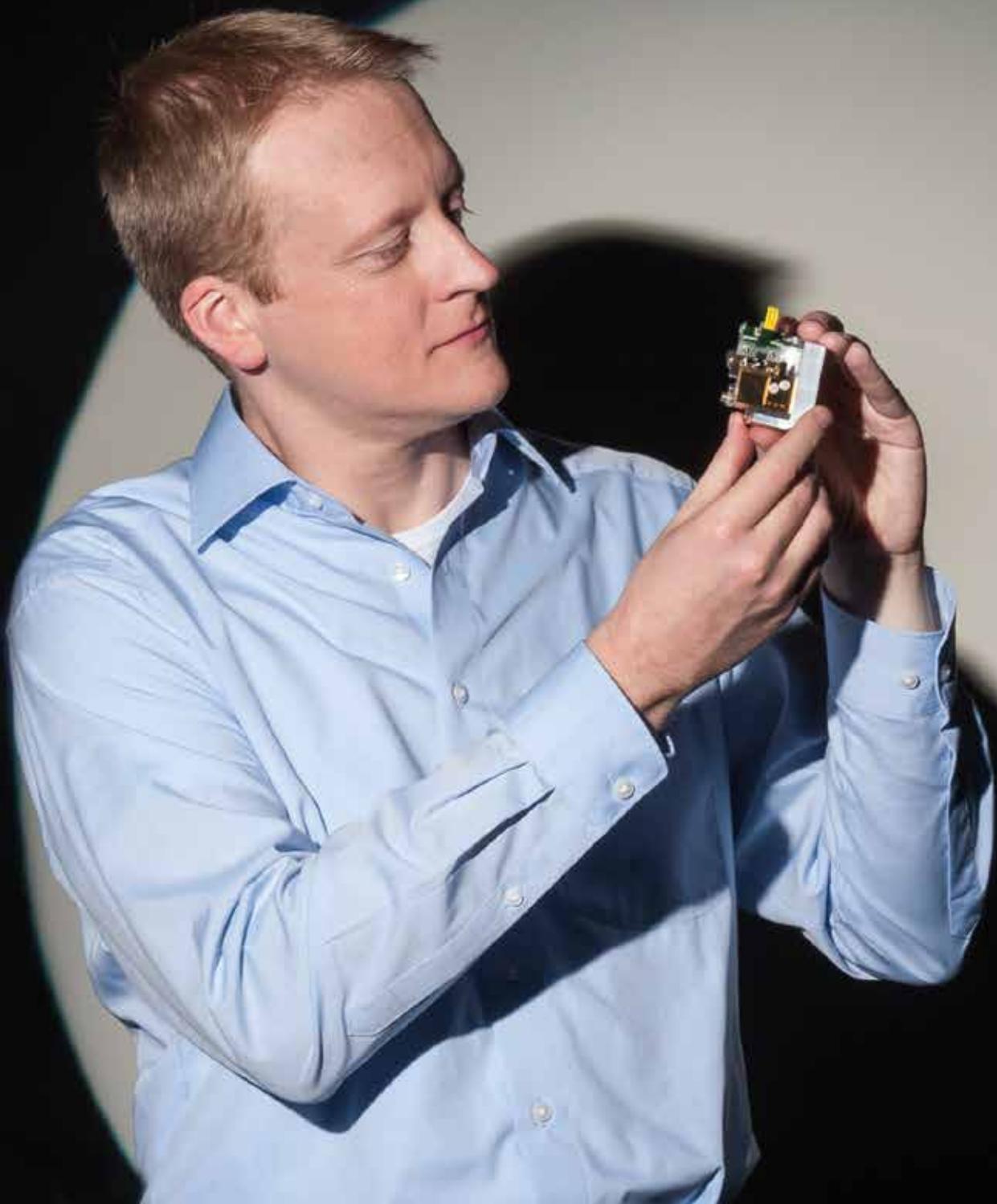
TEL. +49 761 5159-352

JOACHIM.WAGNER@IAF.FRAUNHOFER.DE

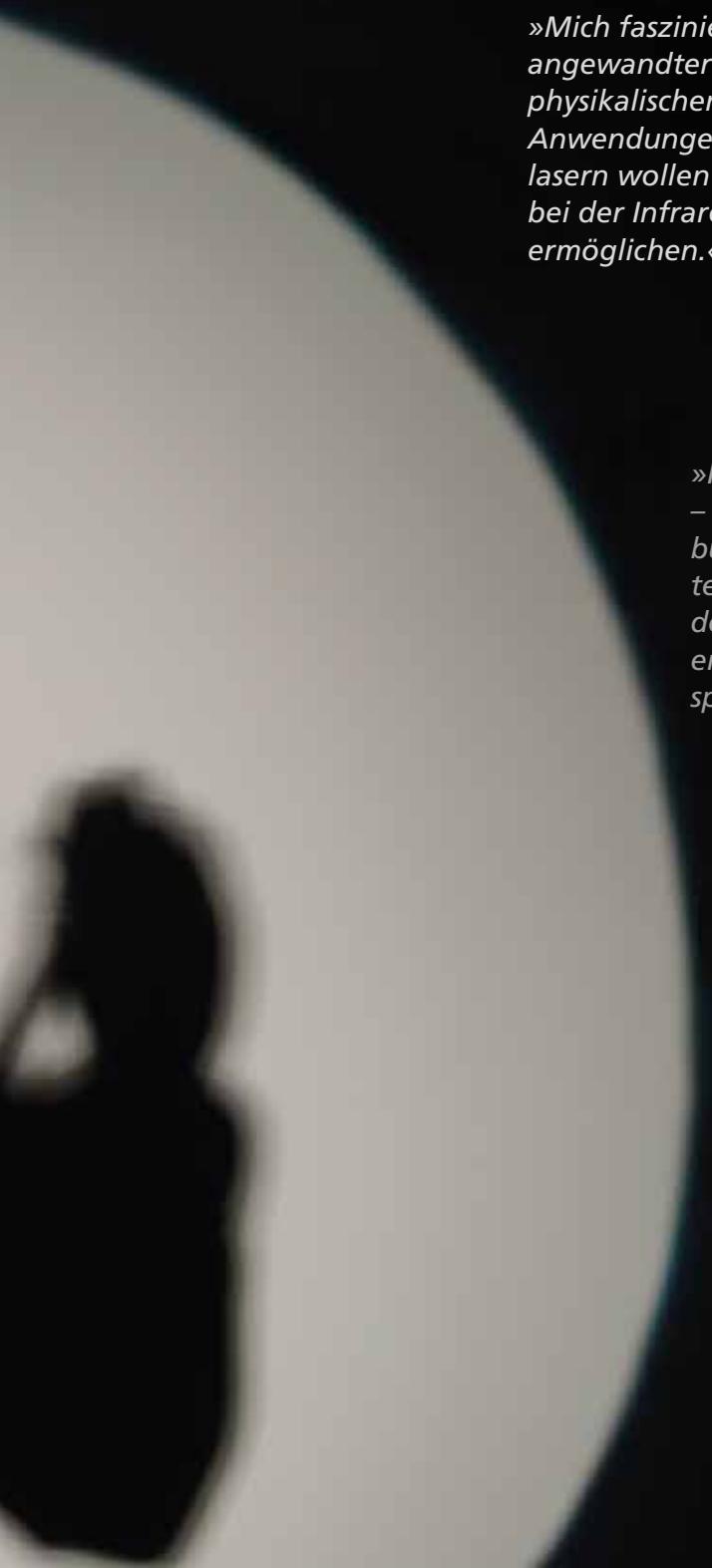
MARCEL RATTUNDE

TEL. +49 761 5159-643

MARCEL.RATTUNDE@IAF.FRAUNHOFER.DE



HALBLEITERLASER



»Mich fasziniert, wie wir mit Quantenkaskadenlasern – dem Ergebnis angewandter Quantentheorie – eine Brücke zwischen grundlegenden physikalischen Effekten, hochkomplexer Technologie und konkreten Anwendungen schlagen können. Mit unseren Quantenkaskadenlasern wollen wir in Zukunft kontinuierliche Echtzeit-Messungen bei der Infrarot-Spektroskopie, beispielsweise für die Prozessanalytik, ermöglichen.«

Ralf Ostendorf, der an Quantenkaskadenlasern für die spektroskopische Analyse forscht.

»I think it is fascinating how quantum cascade lasers – the result of applied quantum theory – enable us to build a bridge between basic physics, highly complex technology and practical applications. With our further developments in the field of EC-QCLs, we are aiming at enabling continuous real-time measurements of infrared spectroscopy, for example in process analytics.«

Ralf Ostendorf, who is working on quantum cascade lasers for spectroscopic analyses.

BRINGING LIGHT INTO THE DARK WITH LASER SPECTROSCOPY MIT LASERSPEKTROSKOPIE LICHT INS DUNKEL BRINGEN

How does the composition of a chemical substance change as a function of applied process parameters? Which chemicals are actually contained in a solution or a liquid? Residues of which substances reside on a surface? Laser spectroscopy allows one to meet the challenge of observing and identifying chemical compounds, or – on a more microscopic scale – to access their molecular composition: mid-infrared spectroscopy reveal the »finger print« of chemical compounds not accessible in the visible spectral range.

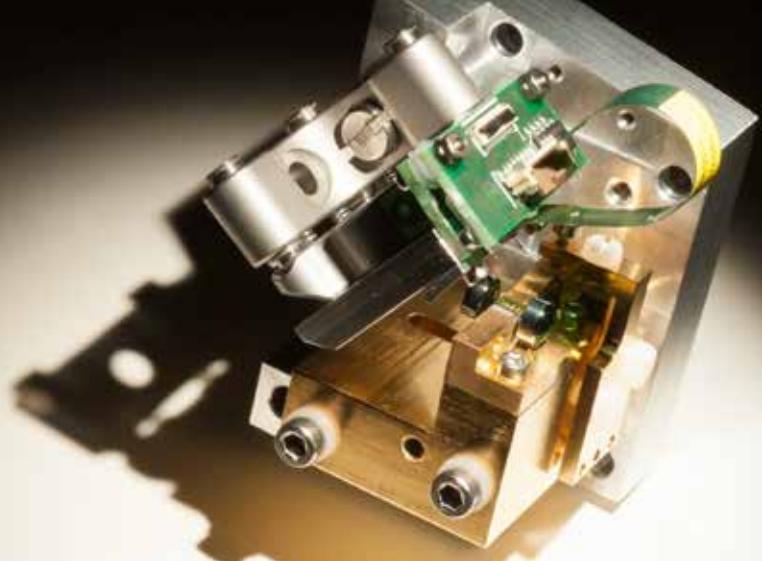
The development of fabrication processes in, for example, the chemical or pharmaceutical industry, could become more efficient and faster if real-time in-line compositional analyses could be applied. The influence of process parameters, such as temperature and pressure, on the substances synthesized could be monitored directly and hence the fabrication process better controlled and made more reproducible. Sophisticated development processes for new medications could become more transparent, complex sequences of experiments could yield results faster – and this could lead to lower development costs on the long run.

To meet this demand, researchers at Fraunhofer IAF develop high-performance broadly tunable quantum cascade lasers (QCL) for the 3 – 11 μm wavelength range, which is particularly suited for the detection and identification of chemical

compounds. In the past year, the size of such a wavelength-tunable QCL could be shrunk to a footprint of just 50 x 40 mm^2 , while the scan speed could be increased to 1 ms for one full wavelength scan. Thanks to their small size, lasers can now be integrated into on-site analyzers, which will deliver real time data due to the high scan rate.

The quantum cascade lasers developed at Fraunhofer IAF bring light into the dark whenever needed to detect and identify substances, indistinguishable with the human eye:

- Process analysis:
Understanding and controlling chemical reactions
- Medical diagnostics and therapy:
Non-invasive breath analysis
- Environmental monitoring and process control:
Continuous on-site monitoring of contaminants in drinking water
- Safety and security:
Detection of residues of explosives on e. g. baggage items at airport security portals



Wie verändern sich Zusammensetzungen von chemischen Substanzen unter bestimmten äußeren Einflüssen? Welche Substanzen befinden sich überhaupt in einer Lösung oder Flüssigkeit? Oder welche Spuren sind auf Oberflächen zurückgeblieben? Wenn es darum geht, Substanzen – und auf mikroskopischer Skala ihre molekulare Zusammensetzung – zu erkennen und zu quantifizieren, sorgt die Laserspektroskopie für Durchblick: Durch Messungen im mittleren Infrarotbereich können für uns unsichtbare Spuren oder chemische Reaktionen einzelner Substanzen sichtbar gemacht werden.

Bei der Entwicklung neuer Herstellungsverfahren, beispielsweise in der Chemie- oder Pharmaindustrie, würde die Analyse der Prozesse in Echtzeit das Verfahren enorm vereinfachen. Der Einfluss von Parametern wie Temperatur oder Druck auf die Zusammensetzung der Stoffe wären dann direkt ablesbar, steuerbar und schließlich gezielt reproduzierbar. Aufwendige Entwicklungsprozesse neuer Medikamente würden für die Wissenschaftler transparenter, langwierige Versuchsreihen kämen schneller zum Ergebnis – und damit ließen sich langfristig auch die Entwicklungskosten senken.

Dazu entwickelt das Fraunhofer IAF leistungsfähige spektral weit abstimmbare Quantenkaskadenlaser für den Wellenlängenbereich von 3 – 11 µm, in dem chemische Verbindungen besonders gut nachweisbar und identifizierbar sind. Im letzten Jahr konnte die Größe der Laser auf eine Grundfläche von 50 x 40 mm² verringert und die Schnelligkeit der spektralen Durchstimmbarkeit auf 1 ms pro Wellenlängen-Scan gesteigert werden. Dank ihrer geringen Größe können die Laser zukünftig direkt in die Messgeräte vor Ort integriert werden und aufgrund ihrer hohen Scanrate Daten in Echtzeit liefern.

Die am Fraunhofer IAF entwickelten Quantenkaskadenlaser bringen überall dort Licht ins Dunkel, wo es um die Detektion von – mit dem menschlichen Auge nicht identifizierbaren – Substanzen geht:

- Prozessanalyse:
Entschlüsselung und Kontrolle chemischer Reaktionen
- Medizinische Diagnostik und Therapie:
Nicht-invasive Atemgasanalysen
- Umwelt- und Produktionsmesstechnik:
Überwachung von Schadstoffen im Trinkwasser, kontinuierlich und direkt vor Ort
- Schutz und Sicherheit:
Detektion geringster Explosivstoffspuren, z. B. auf Gepäckstücken an Flughäfen

MINIATURIZED EXTERNAL CAVITY QUANTUM CASCADE LASERS FOR SPECTROSCOPY

RALF OSTENDORF

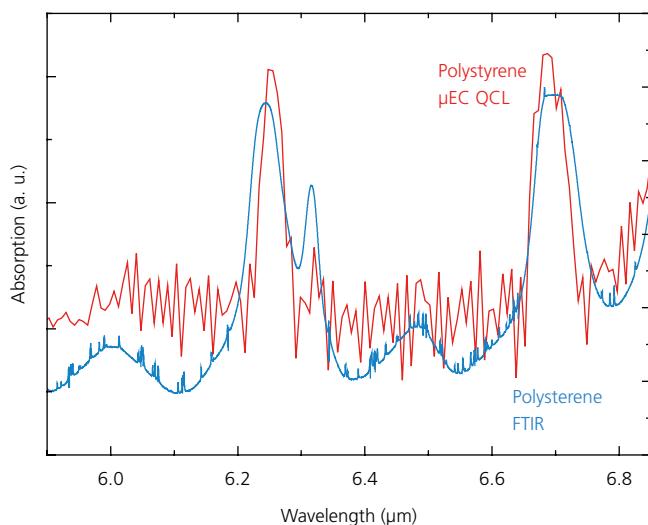
TEL. +49 761 5159-638

RALF.OSTENDORF@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – TUNABLE QC-LASER

- WAVELENGTH: 6.4 μm
- TUNING RANGE: 0.8 μm (250 cm^{-1})
- REPETITION RATE: 1 kHz
- SIZE: 50 x 40 x 52 mm^3

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Absorption spectrum of polystyrene sheet recorded in 64 ms with the rapidly tunable miniaturized EC-QCL (red curve). The reference spectrum (blue curve) of the same sample was recorded with a Fourier transform infrared spectrometer.

Absorptionsspektrum einer Polystyrol-Folie aufgenommen in 64 ms mit einem schnell durchstimmbaren miniaturisierten EC-QCL (rote Kurve). Die Referenzmessung (blaue Kurve) wurde mit einem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer aufgenommen.

A rapidly tunable and miniaturized mid-infrared laser source was realized by integrating fast scanning optical micro gratings based on MEMS technology into external cavity quantum cascade lasers. The miniaturization enables the use of the laser source as a core light engine for compact mid-infrared sensing systems, for instance in chemical process control and medical diagnostics. The prototype of the laser source allows for wavelength scan frequencies of 1 kHz over a wide spectral tuning range, therefore being well-suited for real-time sensing applications.

The pharmaceutical and the chemical industry are facing an increasing pressure to reduce cycle times and costs while raising yield and quality in the development of novel active ingredients, in order to be competitive in the global market. Consequently, there is a growing demand for real-time analytical proceedings to already determine material composition during the synthesis of the active substances. Such an online process control enables rapid process monitoring and quality control as well as the optimization of the production process to save time, energy and resources. Additionally, application fields such as high sensitivity trace gas detection, e. g. in medical diagnostics or food quality monitoring, will benefit from the availability of such real-time analysis techniques.

Recently, the mid-infrared (MIR) region has emerged as an interesting wavelength regime for identifying and quantifying chemical compounds. This particular wavelength range from 3 to 11 μm is also often referred to as the »fingerprint region« since most compounds exhibit strong and characteristic absorption lines here allowing for an unambiguous identification of those substances. A very promising solution making use of these prominent absorption features is the MIR laser spectroscopy which is rapidly evolving due to the growing availability of quantum cascade lasers (QCL) in recent years. Quantum cascade lasers are semiconductor based light sources capable of covering the important fingerprint wavelength region while simultaneously providing high spectral brightness. Spectral tuning of more than 400 cm^{-1} is possible by placing a QCL in an

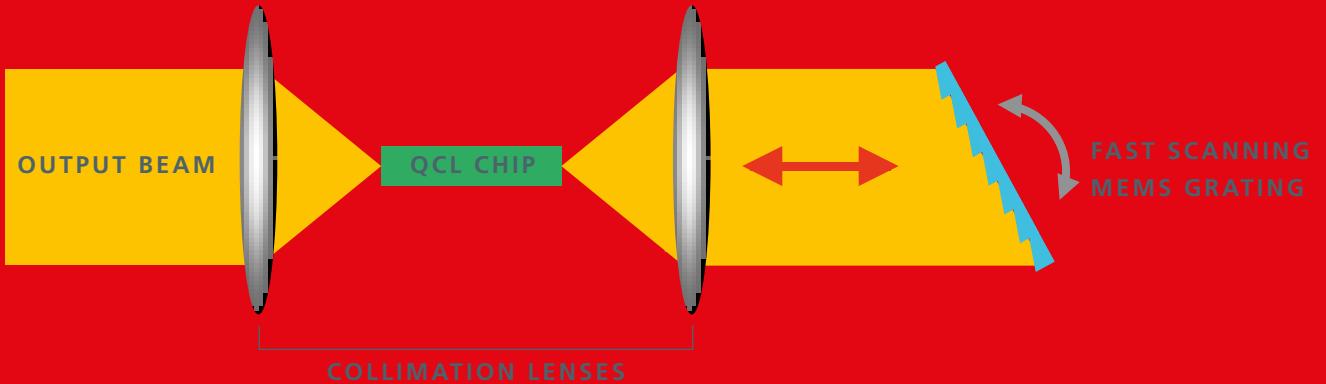
MINIATURISIERTE QUANTENKASKADEN-LASER FÜR DIE SPEKTROSKOPIE

Durch die Kombination von Quantenkaskadenlasern mit schnell oszillierenden optischen Mikrogittern, wurde am Fraunhofer IAF eine miniaturisierte und mit hoher Wiederholrate spektral abstimmbare Mittleres-Infrarot-Laserquelle realisiert. Die auf MEMS-Technologie basierenden Mikrogitter wurden dabei als wellenlängenselektives Element im externen Resonator des Quantenkaskadenlasers integriert. Der hohe Grad der Miniaturisierung dieser Laserquelle erlaubt ihren Einsatz in kompakten Sensorsystemen, beispielsweise in den Bereichen der chemischen Prozessanalytik oder der medizinischen Diagnostik. Der Prototyp dieser innovativen Laserquelle kann spektral über einen breiten Wellenlängenbereich mit einer Wiederholrate von 1 kHz durchgestimmt werden und eignet sich daher besonders für Echtzeitmessungen.

Um im globalen Wettbewerb bestehen zu können, sehen sich die chemische und die pharmazeutische Industrie zunehmend der Herausforderung gegenüber, neue Wirkstoffe in immer kürzeren Zykluszeiten, bei gleichzeitig reduzierten Kosten und hohem Ertrag, herzustellen. Damit steigt auch der Bedarf an echtzeitfähigen Analyseverfahren, die in der Lage sind, stoffliche Zusammensetzungen bereits während der Synthese der Wirkstoffe zu bestimmen. Eine solche Online-Prozesskontrolle ermöglicht sowohl eine hohe Produktqualität, als auch eine schnelle Prozessoptimierung, um Zeit, Energie und Ressourcen zu sparen. Auch andere Anwendungsbereiche wie z. B. die Spurengas-Analyse in der medizinischen Diagnostik oder die industrielle Kontrolle der Lebensmittelqualität profitieren von der Verfügbarkeit solcher Analysesysteme.

In letzter Zeit hat sich besonders der Wellenlängenbereich des mittleren Infrarot (MIR) für die Identifizierung chemischer Stoffe etabliert. Der Spektralbereich von 3 bis 11 μm wird häufig als »Fingerprint-Bereich« bezeichnet, da viele Verbindungen hier sehr ausgeprägte und charakteristische Absorptionsbanden aufweisen, die eine zweifelsfreie Identifikation von Substanzen ermöglichen. Eine vielversprechende Analysetechnik, die diese prägnanten Absorptionslinien nutzt, ist die MIR-Laserspektroskopie. Diese Technik hat sich vor allem durch die zunehmende Verfügbarkeit von Quantenkaskadenlasern (QCL) rasant weiterentwickelt. Quantenkaskadenlaser sind halbleiterbasierte Lichtquellen, die in der Wellenlänge des Fingerprint-Bereichs mit hoher spektraler Brillanz emittieren. Die Abstimmbarkeit der Wellenlänge wird dadurch erreicht, dass der QCL in einem externen Resonator mit einem wellenlängenselektiven Element, beispielsweise einem Beugungsgitter, betrieben wird (EC-QCL). Um einen spektral breitbandig abstimmbaren EC-QCL als Lichtquelle in einem kompakten echtzeitfähigen MIR-Sensorsystem einzusetzen, muss die Abstimmung der Wellenlänge über den gesamten Durchstimbereich hinweg innerhalb weniger Millisekunden erfolgen. Somit muss die Wiederholrate des EC-QCLs vom Bereich einiger hundert Hz bis hin in den kHz-Bereich reichen.

Im Rahmen des Projekts »KompLas« arbeitet das Fraunhofer IAF zurzeit an der Entwicklung einer innovativen schnell durchstimmmbaren und miniaturisierten MIR-Laserquelle für die Integration in modulare echtzeitfähige Sensorsysteme. Die Laserquelle kombiniert Quanten-



2

external cavity (EC-QCL) with a wavelength selective element, e. g. a diffraction grating. In order to use broadband tunable external cavity quantum cascade lasers as a core light engine in compact MIR real-time spectroscopic measurement systems the wavelength scan rate has to be in the range of several hundreds Hz up to the kHz range i. e. a single wavelength scan is performed in just a few milliseconds.

In the framework of the project »KompLas« Fraunhofer IAF is currently developing a novel rapidly tunable and miniaturized MIR laser source combining external cavity quantum cascade lasers and fast scanning optical micro gratings for the use in a modular real-time MIR sensing system. The miniaturized EC-QCL is operated in a Littrow configuration i. e. the light diffracted in first order off the diffraction grating is coupled back into the QCL chip for wavelength selection (Fig. 2). The scanning micro gratings used for wavelength tuning are based on the technology platform developed at Fraunhofer IPMS in Dresden for the fabrication of micro-electrical-mechanical-systems (MEMS) scanners. The MEMS chip has a size of $10 \times 7 \text{ mm}^2$ and contains a scanner plate with an integrated diffraction grating. The scanner plate of 5 mm in diameter was designed for a large deflection angle up to 10 degrees in order to enable a wide spectral tuning range of the EC-QCL. By integrating micro lenses directly on the heatsink of the QCL chip it was possible to reduce the length of the external cavity to just 7 mm.

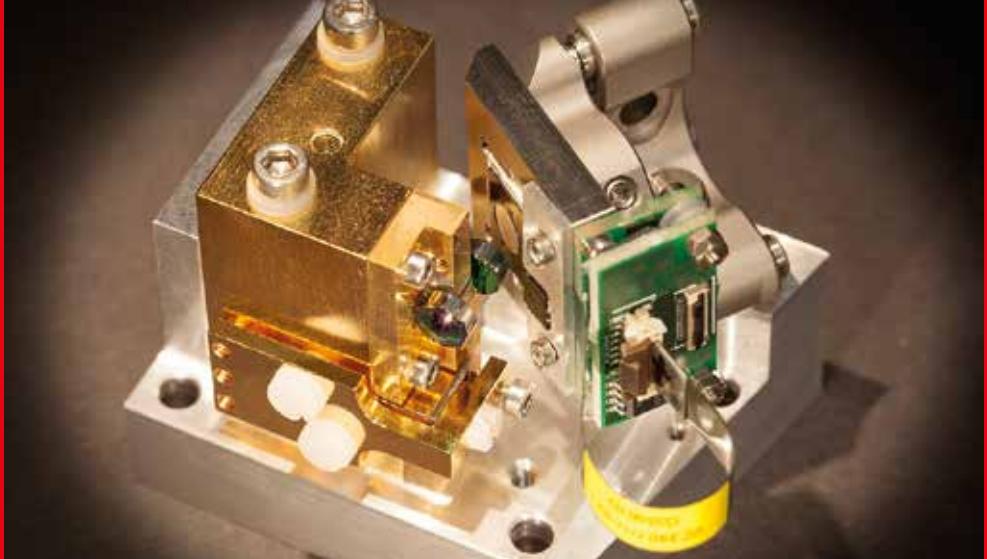
One of the main challenges in the realization of the miniaturized EC-QCL is to achieve a spectral resolution which is sufficient for sensing applications. The spectral resolution which is typically required for transmission measurements of liquids ranges from $1 - 2 \text{ cm}^{-1}$. The spectral resolution of an EC-QCL directly depends on the number of illuminated grating lines and, thus, on the beam diameter inside the external cavity. Because of the miniaturization of the external cavity and the resulting small beam diameters, the geometry of the

diffraction grating had to be thoroughly optimized for the MIR wavelength regime in order to provide high optical feedback and sufficient spectral resolution even at this significantly reduced form factor simultaneously. The optimization of the diffraction grating was performed in close collaboration with Fraunhofer IPMS which developed a process to integrate the optical grating in the MEMS scanner design. Using this optimized grating design a spectral resolution of 1.5 m^{-1} was demonstrated with a side mode suppression of more than 20 dB.

A first prototype of the miniaturized external cavity quantum cascade laser was completed in October 2014 (Fig. 3). The prototype has a footprint of $40 \times 50 \text{ mm}^2$ and allows for a wavelength scan rate of 1 kHz at a spectral tuning range of more than 250 cm^{-1} . In cooperation with three further Fraunhofer Institutes this rapidly tunable prototype is now going to be evaluated in the framework of »KompLas« for the application in industrial process control (Fraunhofer ICT), breath analysis (Fraunhofer ITEM) and food quality monitoring (Fraunhofer IVV), respectively.

The impressive real-time sensing capabilities of the miniaturized EC-QCL on solid and liquid samples could already be demonstrated by a transmission measurement on a polystyrene sheet. For this measurement the EC-QCL was tuned over a wavelength range from 5.9 to $6.8 \mu\text{m}$ with a repetition rate of 1 kHz. Fig. 1 displays the transmission spectrum averaged over 64 individual scans (red curve), corresponding to a total recording time of 64 ms. The comparison with a reference Fourier transform infrared spectra recorded with the same sample (blue curve) shows that the absorption features of polystyrene in this spectral range can clearly be resolved.

The work on the miniaturized EC-QCL is supported by the Fraunhofer project »KompLas« and the European project »MIRIFISens«.



3

2 Principle setup of the QCL chip in an external cavity with fast scanning optical micro gratings in a Littrow configuration.

Schematische Darstellung des QCL-Chips im externen Resonator mit einem schnell oszillierenden MEMS-Gitter in Littrow-Anordnung.

3 Prototype of the miniaturized EC-QCL with a MEMS grating in Littrow configuration as a wavelength selective element. The size is 50 mm x 40 mm x 52 mm.

Prototyp des miniaturisierten EC-QCLs mit einem MEMS-Gitter in Littrow-Anordnung als wellenlängenselektives Element.

Die Abmessungen sind 50 mm x 40 mm x 52 mm.

kaskadenlaser im externen Resonator mit schnell oszillierenden optischen Mikrogittern als wellenlängenselektives Element. Der EC-QCL wird dabei in Littrow-Konfiguration betrieben. Das bedeutet, dass die erste Beugungsordnung des Gitters in den Laserchip für die Wellenlängenselektion zurückgekoppelt wird (Abb. 2). Die schnell oszillierenden Mikrogitter basieren auf der Technologie der MEMS-Scanner und wurden vom Fraunhofer IPMS entwickelt. Der MEMS-Chip hat eine Größe von $10 \times 7 \text{ mm}^2$ und verfügt über eine Scannerplatte mit einem Durchmesser von 5 mm, auf die ein optisches Beugungsgitter integriert ist. Eine weitere Miniaturisierung des EC-QCLs erfolgte über die Integration von Mikrolinsen direkt auf die Wärmesenke des QCL-Chips. Hierdurch konnte die Länge des externen Resonators auf 7 mm reduziert werden.

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung der miniaturisierten Lichtquelle ist es, die für spektroskopische Anwendungen notwendige spektrale Auflösung zu erreichen. Typische Werte für Transmissionsmessungen an flüssigen Substanzen liegen bei $1 - 2 \text{ cm}^{-1}$. Die spektrale Auflösung eines EC-QCLs hängt direkt von der Zahl der ausgeleuchteten Gitterstriche und damit vom Strahldurchmesser innerhalb des externen Resonators ab. Der Strahldurchmesser beträgt aufgrund des hohen Miniaturisierungsgrads nur wenige Millimeter, sodass sowohl die Gitterkonstante als auch die Geometrie des optischen Gitters speziell auf den MIR-Bereich optimiert wurde, um einerseits eine möglichst hohe optische Rückkopplung und andererseits die bestmögliche spektrale Auflösung zu erreichen. Die Optimierung der Gitterstruktur wurde dabei in enger Kooperation mit dem Fraunhofer IPMS durchgeführt. Dort wurde auch schließlich ein Prozess für die Implementierung der Gitterstruktur in den Herstellungsprozess der MEMS-Scanner entwickelt. Mit dem optimierten Gitterdesign wird eine spektrale Auflösung von $1,5 \text{ cm}^{-1}$ mit einer Seitenmoden-Unterdrückung von mehr als 20 dB erreicht.

Ein erster Prototyp des miniaturisierten EC-QCLs mit einer Grundfläche von $40 \times 50 \text{ mm}^2$ wurde im Oktober 2014 fertig gestellt (Abb. 3). Der Spektralbereich von mehr als 250 cm^{-1} kann mit einer Frequenz von 1 kHz abgestimmt werden. In Zusammenarbeit mit drei weiteren Fraunhofer-Instituten wird dieser schnell durchstimmbare Prototyp nun für Anwendungen in den Bereichen der industriellen Prozessanalytik (Fraunhofer ICT), der Atemgas- und Aerosolanalytik (Fraunhofer ITEM) sowie der Lebensmittelkontrolle (Fraunhofer IVV) getestet. Die Fähigkeiten des miniaturisierten EC-QCLs im Bereich der Echtzeit-Sensorik von festen und flüssigen Substanzen konnten bereits eindrucksvoll im Labor an einer Transmissionsmessung an einer Polystyrol-Folie gezeigt werden. Der miniaturisierte EC-QCL wurde dazu über einen Wellenlängenbereich von $5,9 \text{ } \mu\text{m}$ bis $6,8 \text{ } \mu\text{m}$ gescannt. Abb. 1 zeigt eine Mittelung über insgesamt 64 Spektren, die in einer Zeit von 64 ms aufgenommen wurden (rote Kurve). Der Vergleich mit einer an einem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer aufgenommenen Referenzmessung (blaue Kurve) zeigt, dass die charakteristischen Absorptionslinien des Polystyrols deutlich in der Messung aufgelöst werden können. Die Arbeiten an dem miniaturisierten EC-QCL werden gefördert durch das Fraunhofer-Projekt »KompLas« und das EU-Projekt »MIRIFISens«.

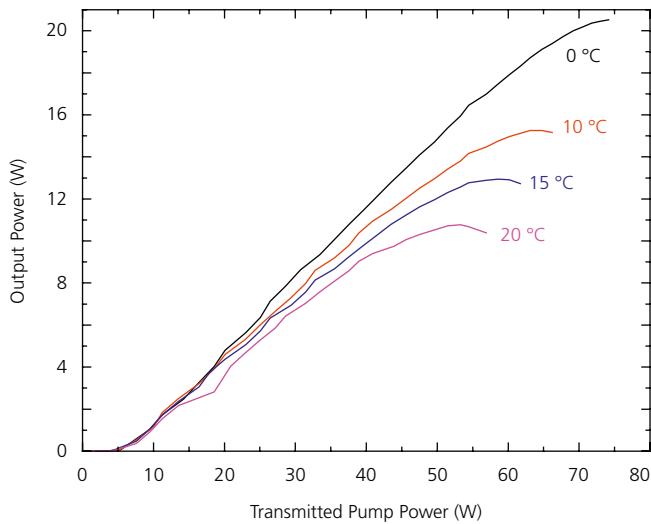
LESS HEAT – MORE POWER: 2 μm SEMICONDUCTOR DISK LASER

MARCEL RATTUNDE
TEL. +49 761-5159-643
MARCEL.RATTUNDE@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – 2 μm DISK LASER

- CW OUTPUT POWER AT 2.0 μm : UP TO 20 W
- DIFFERENTIAL POWER EFFICIENCY: 30 %
- WAVELENGTH RANGE: 1.9 TO 2.8 μm
- FOOTPRINT SDL MODULE: 13 x 8 cm^2

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 *Output power characteristic of a low-quantum-deficit-design SDL at 2.0 μm emission wavelength with the new heat-sinking technology. Over 20 W of continuous wave-output power are reached at 0 °C and still 10 W cw at 20 °C heatsink temperature.*

Leistungscharakteristik eines hocheffizienten 2- μm -SDL-Chips, aufgebaut mit der neuen Wärmesenkentechnologie. Bei 0 °C werden 20 W Ausgangsleistung im cw-Betrieb erreicht und über 10 W cw-Leistung bei 20 °C Wärmesenkentemperatur.

With the combination of a new semiconductor design and an improved mounting technique, Fraunhofer IAF was able to boost the efficiency as well as the output power of semiconductor disk lasers in the wavelength range above 2 μm and to establish a new international state-of-the-art. In a European project, together with scientist from the Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP in Glasgow and two companies, these new laser sources are tailored for specific applications in the areas of medical therapy, material processing and sensing.

Optically pumped semiconductor disk lasers (SDLs), also referred to as vertical external cavity surface-emitting lasers (VECSELs), have been attracting considerable interest for several years as they are capable of delivering a high output power (several Watt continuous wave level) and an excellent beam quality simultaneously. Variation of the semiconductor heterostructure active medium allows these lasers to be realized in a broad range from 650 nm up to 5 μm . The principle setup of an SDL is shown schematically in Fig. 2. The semiconductor chip is optically pumped by a diode laser and the laser cavity is formed by a distributed Bragg reflector (DBR) located inside the semiconductor structure underneath the active region, and one or more external cavity mirrors.

At Fraunhofer IAF, infrared SDLs with emission in the application-rich 2 – 3 μm wavelength range (denoted as 2.X μm in the following) are designed and fabricated by exploiting the AlGaN/AsSb semiconductor material system. So far, these 2 μm SDLs were pumped with 980 nm diode lasers, resulting in a high quantum deficit of over 50 %, this means that 50 % of the power is lost and converted into heat simply due to the lower energy of a 2.X μm photon compared to the 980 nm pumpphoton. This quantum deficit, ultimately limiting the achievable power conversion efficiency, is illustrated in Fig. 3, where the dark grey and blue areas denote the fraction of pump photon energy that is converted into heat and which is used for the emitted laser photon, respectively. In order to improve this conversion efficiency and to reduce the amount

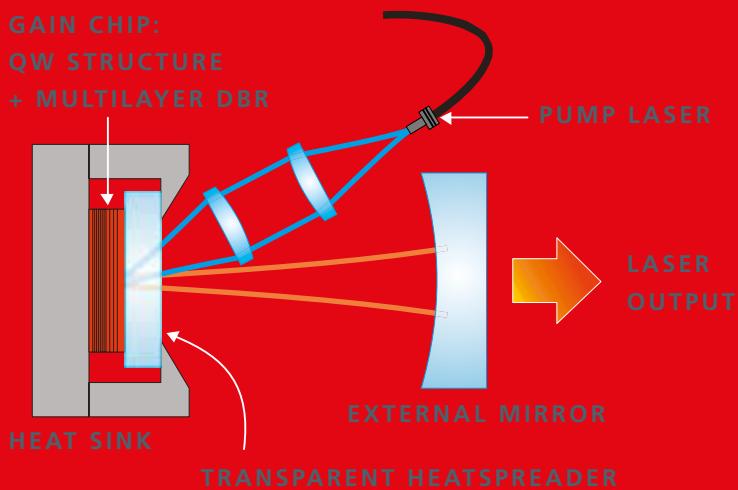
WENIGER WÄRME – MEHR LEISTUNG: 2- μ m-HALBLEITER-SCHEIBENLASER

Durch die gleichzeitige Verbesserung des Schichtdesigns sowie der Aufbautechnik von Halbleiter-Scheibenlasern im Wellenlängenbereich um 2 μ m konnten am Fraunhofer IAF neue internationale Bestwerte für deren Ausgangsleistung und Leistungseffizienz erreicht werden. Zusammen mit Wissenschaftlern vom Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP in Glasgow sowie zwei weiteren Unternehmen wird in einem europäischen Projekt an effizienten Halbleiterlasern gearbeitet, um hybride Halbleiter-Festkörper-Lasersysteme für die medizinische Therapie, die Materialbearbeitung sowie die Sensorik maßgeschneidert zu entwickeln.

Halbleiter-Scheibenlaser (semiconductor disk laser, SDL), auch bekannt unter der Abkürzung VECSEL (vertical external cavity surface-emitting laser), zeichnen sich durch eine hohe Ausgangsleistung bei gleichzeitig sehr guter Strahlqualität aus. Durch Variation der Halbleiter-Heterostruktur im aktiven Bereich der SDL können diese mit Emissionswellenlängen von 650 nm bis hin zu 5 μ m realisiert werden. Der grundlegende Aufbau eines SDLs ist in Abb. 2 dargestellt: Der Halbleiter-Chip wird optisch durch einen Diodenlaser gepumpt und der Laserresonator wird zum einen durch den im Chip integrierten DBR-Spiegel (»distributed bragg reflector«) und zum anderen durch einen oder mehrere externe Spiegel gebildet.

Am Fraunhofer IAF werden Halbleiter-Scheibenlaser basierend auf dem AlGaIn/AsSb-Materialsystem für den Wellenlängenbereich von 2 – 3 μ m entwickelt. In dem bisher angewandten Konzept wurden diese SDLs mit 980 nm Diodenlasern gepumpt. Die Energie der Pumpphotonen ist hierbei jedoch deutlich größer als die der Laserphotonen, was dazu führt, dass selbst bei 100 % Quanteneffizienz (d. h. selbst wenn jedes Pumpphoton in ein Laserphoton umgewandelt wird) über 50 % der Pumpleistung in Form von Wärme verloren geht. Um den Anteil der Verlustwärme, und damit die Aufheizung, innerhalb des Halbleiter-Chips zu reduzieren, wurde die SDL-Struktur für längerwellige Pumpphotonen optimiert. Diese neuen Laserstrukturen sind ausgelegt für eine Pumpwellenlänge von 1470 nm, wodurch sich die Energiedifferenz zwischen Pump- und Laserphoton, und damit die generierte Verlustwärme, auf 25 % reduziert (Abb. 3). Durch dieses Konzept konnte die Leistungseffizienz der Halbleiter-Scheibenlaser deutlich gesteigert werden. In einem direkten Vergleich zweier SDL-Strukturen, die sich in ihrer Optimierung für die oben genannten Pumpwellenlängen unterscheiden, jedoch dieselbe Emissionswellenlänge (2,0 μ m) besitzen, wird dies deutlich: Die 980-nm-gepumpte SDL-Struktur zeigt eine differenzielle Leistungseffizienz η_d von 20 %, die 1470-nm-gepumpte Struktur weist dagegen einen deutlich höheren Wert von 29 % auf.

Neben dieser Optimierung der SDL-Struktur, die zu einer verbesserten Leistungseffizienz führt, wurde am Fraunhofer IAF auch die Aufbautechnik der SDL-Chips verbessert, sodass die verbleibende Verlustwärme effizienter abgeführt werden kann: Bei der bisher verwendeten Aufbautechnik wurde ein transparenter Wärmespreizer aus Siliziumcarbid (SiC) mit der Halblei-



2

of heat generated inside the semiconductor, Fraunhofer IAF optimized the SDL structure for diode pumping at 1470 nm, resulting in a reduced quantum defect in the range of 25 % (Fig. 3). This was the key to a pronounced increase in power efficiency of these devices: a direct comparison of two SDL samples with the same emission wavelength (2.0 μm) but designed for the two different pump wavelength mentioned above, revealed an increase of the slope efficiency of almost 50 %. Thus, the differential power efficiency η_d was increased from 20 % (980 nm pumping) to 29 % (1470 nm pumping), when optimizing the cavity setup for maximum output power.

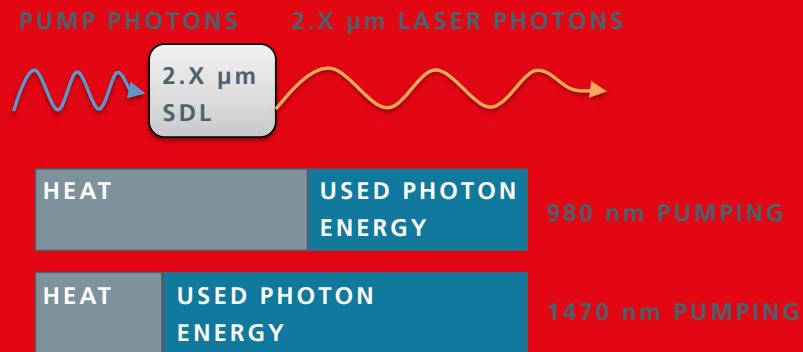
Beside this improvement of the semiconductor structure itself, Fraunhofer IAF also improved the mounting technology of its SDLs: so far, the »standard« technology used for heat removal was a transparent intracavity heatspreader, bonded onto our SDL chip (Fig. 2). This way, the heat is removed directly at the top surface. With careful numerical simulations of the heat transfer from the active region inside the SDL chip to the surrounding submount, several scenarios were analyzed in order to find ways to further reduce the thermal resistance of the mounted SDL structures. These simulations were followed by the development of technological steps required for realizing the most promising option. The result is a mounting technology, where heat from the active region is removed from the front and back side of the SDL chip simultaneously, leading to a reduced chip temperature at a given pump power density.

The combination of both, low quantum deficit design of the SDL structure and an improved thermal resistance of the mounted chips, leads to unprecedented power levels for SDLs emitting in the wavelength range beyond 1 μm . Fig. 1 shows the output power characteristics of a GaSb-based SDL emitting at 2.0 μm wavelength in a single-chip linear cavity, incorporating the new technological features described above. In continuous wave operation (cw), 20 W output power

at a heatsink temperature of 0 °C and over 15 W (10 W) at 10 °C (20 °C) were achieved. The slope efficiency reaches values as high as 33 % at 0 °C and 28 % at 20 °C.

While the results above were realized in a laboratory environment (i. e. technology readiness level TRL 3 – 4), a compact prototype for these new SDL laser setup has also been realized at Fraunhofer IAF, demonstrating TRL 5. The compact SDL laser head has a footprint of just 13 x 8 cm^2 and is able to emit up to 8 W cw output power. The optical fiber delivers the 1470 nm pump light from a diode laser module. With this new powerful SDL technology at hand, Fraunhofer IAF is now developing tailored laser modules for specific applications within the framework of the EuroStars project »NovIRLas« (Novel IR-laser source for active spectroscopy and medical applications). Together with the German company LISA laser products OHG, one application strand is the development of a specialized laser source for medical therapy. The task is to convert the high cw-power level of the SDL into a high peak-power level in the mJ-range, necessary for certain applications in medical therapy. This is done by using an Holmium-based q-switched solid state laser, pumped by a 2 μm SDL. Due to the long upper-state lifetime of the relevant levels of Holmium, the pump energy can be stored effectively and intense laser pulses at almost the same emission wavelength (2.1 μm) can be generated.

The second application strand is to use the SDL as pump source for a novel type of optical parametric oscillators (OPOs). This work is done in close cooperation with the Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP in the UK and the UK-based company M Squared Lasers. The goal is to develop a broad-tunable light source in the 5 – 10 μm wavelength range, capable of pulsed and cw operation for spectroscopy and active imaging.



3

2 Schematic setup of a semiconductor disk laser with intracavity heatspreader in a standard linear cavity.

Schema eines Halbleiter-Scheibenlasers mit integriertem Wärmespreizer in einem einfachen linearen Resonator.

3 Illustration of the quantum deficit, i. e. the amount of heat generated when converting a photon of the pump diode into a laser photon around 2 μm wavelength by the SDL. Using a low quantum deficit design with 1470 nm pump photons, the fraction of wasted heat is greatly reduced.

Illustration der Effizienzsteigerung durch geringeren Energieunterschied zwischen Pump- und Laserphoton: Bei 1470 nm Pump- und 2 μm Emissionswellenlänge ist der Unterschied der Photonenergie und damit die generierte Verlustwärme deutlich geringer als bei 980 nm Pumplicht.

terstruktur verbunden und die Verlustwärme über die Oberfläche des Chips abgeleitet (Abb. 2). Durch numerische Simulationen wurden verschiedene Szenarien der Wärmeleitung vom aktiven Bereich innerhalb der SDL-Struktur bis hin zur umgebenden Wärmesenke analysiert. Anschließend wurden die für die vielversprechendste Option benötigten Schritte der Aufbau- und Verbindungstechnik entwickelt. So konnte eine neue Aufbautechnik realisiert werden, bei der die Verlustwärme gleichzeitig sowohl von der Ober- sowie von der Unterseite des SDL-Chips abgeführt wird, was zu niedrigeren Chiptemperaturen bei gegebener Pumpleistungsdichte führt.

Durch die Kombination aus hocheffizienter SDL-Struktur einerseits sowie verbesserter Entwärmung der Halbleiterchips andererseits konnten bisher unerreichte Ausgangsleistungen für Halbleiter-Scheibenlaser mit einer Emissionswellenlänge oberhalb von 1 μm erreicht werden: In Abb. 1 ist die Leistungscharakteristik eines GaSb-basierten SDLs bei 2,0 μm Emissionswellenlänge gezeigt, der die beiden neuen Technologien in sich vereint. Im Dauerstrichbetrieb (continuous-wave, cw) werden 20 W Ausgangsleistung bei einer Wärmesenkentemperatur von 0 °C erreicht sowie über 15 W (10 W) bei 10 °C (20 °C). Die differenzielle Leistungseffizienz erreicht 33 % bei 0 °C und beträgt immer noch 28 % bei 20 °C. Während diese Ergebnisse im Labor erzielt wurden, und somit ein TRL (»technology readiness level«) von 3 – 4 aufweisen, wurde bereits ein kompakter Prototyp für ein leistungsstarkes SDL-Modul am IAF realisiert, was einem TRL von 5 entspricht. Dieses Modul hat eine Grundfläche von nur 13 x 8 cm² und emittiert bis zu 8 W im cw-Betrieb. Das SDL-Modul wird von einem 1470 nm fasergekoppelten Diodenlaser gepumpt.

Diese neue, leistungsstarke SDL-Lasertechnologie setzt das Fraunhofer IAF nun ein, um im Rahmen des EuroStars-Projekts »NovIRLas« (Novel IR-laser source for active spectroscopy and medical applications) anwendungsspezifische Lasermodule zu entwickeln. Ein Ziel in Zusammenarbeit mit der deutschen Firma LISA laser products OHG ist die Realisierung eines Lasers für die medizinische Therapie. Die Herausforderung besteht darin, die hohe cw-Leistung des SDLs in eine hohe Pulsennergie im mj-Bereich umzusetzen, wie sie für bestimmte medizinische Anwendungen benötigt wird. Dies wird durch einen Holmium-basierten, gütegeschalteten Festkörperlaser realisiert, der durch einen 2-μm-SDL gepumpt wird. Durch die lange Lebensdauer des oberen Laserniveaus in Holmium kann die Pumpenergie effizient gespeichert und in intensive Laserpulse bei nur geringfügig veränderter Emissionswellenlänge (2,1 μm) umgewandelt werden. Weiterhin werden in Rahmen von »NovIRLas« die 2-μm-SDLs als Pumpquelle für optisch parametrische Oszillatoren (OPOs) eingesetzt. In Kooperation mit dem Fraunhofer Centre for Applied Photonics CAP in Glasgow sowie der ebenfalls in Großbritannien ansässigen Firma M Squared Lasers, soll eine OPO-basierte, im 5 – 10 μm Wellenlängenbereich breit abstimmbare Laserquelle für spektroskopische Aufgaben entwickelt werden.

ENERGY-EFFICIENT LED LIGHTING BASED ON GALLIUM NITRIDE

MICHAEL KUNZER

TEL. +49 761 5159-844

MICHAEL.KUNZER@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – LED RETROFIT LAMP

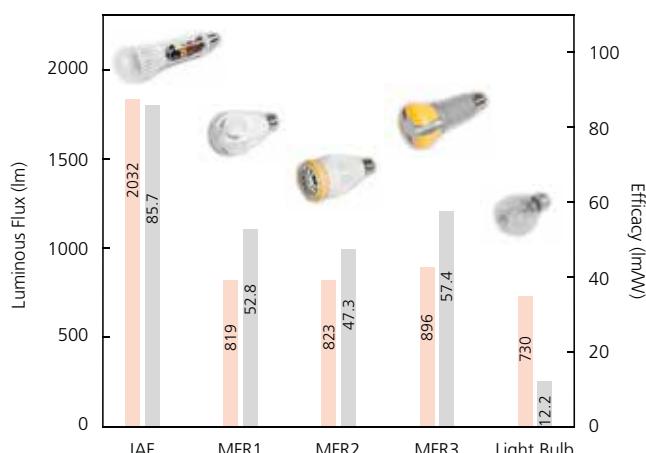
- LUMINOUS FLUX: 2032 lm
- INPUT POWER: < 25 W
- EFFICIENCY: 86 lm/W
- DRIVER EFFICIENCY: 86 %

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



Gallium nitride (GaN) is not only the semiconductor utilized for highly efficient blue and white light emitting diodes (LEDs), the backbone of the solid state lighting. It also has considerable capabilities for the efficiency, size and cost improvement of the power converters needed for the grid voltage operation of LED lamps. Based on Fraunhofer IAF's GaN-on-Si technology, a compact power converter for LED retrofit lamps has been realized. Utilizing this LED driver, a compact LED retrofit lamp with a luminous flux of 2032 lm, thus twice as high as commercial models, and an efficacy of 86 lm/W is demonstrated.

Almost 20 % of the global power consumption is currently used for lighting. During the last years, a dramatic increase of the light output of white LEDs and their considerable cost reduction allow the vision of solid state lighting to become true. This trend is further advanced by the ban of the incandescent light bulb by the EU and the ban of halogen lamps to follow in 2016. However, many existing lamp installations do still rely on traditional E14 and E27 screw sockets. The LED retrofit lamp for use in standard bulb fittings is an important transition step into solid state lighting. The major drawback of this lamp type, however, is its limited size, weight and heat dissipation, perfect for hot filament-based incandescent light sources, but not particularly well suited for LED diodes with their limited maximum permissible junction temperature. This leads to surface temperatures of current LED retrofit lamps in excess of 80 °C with junction temperatures well above. While LED equivalents for 60 W with 700 lm luminous flux are commercialized, 100 W replacements with 1400 lm in standard E27 form factor are still missing.



1 Luminous flux and efficacy of the Fraunhofer IAF LED demonstrator lamp with a GaN-based LED driver compared to different models with Si-based driver and to a 60 W light bulb.

Lichtstrom und Gesamteffizienz der LED-Lampe des Fraunhofer IAF im Vergleich zu verschiedenen kommerziellen Modellen mit Si-Treiberelektronik und zu einer 60 W Glühlampe.

The most important building block of such LED retrofit lamps is the LED module itself. Since the LED efficiency drops about 0.25 % per Kelvin with increasing junction temperature, efficient heat dissipation is a key factor for bright and efficient LED lamps. At Fraunhofer IAF, efficient fully ceramic AlGaN LED modules have been developed. They utilize thin-film LED chips in a ceramic package. These LEDs are subsequently

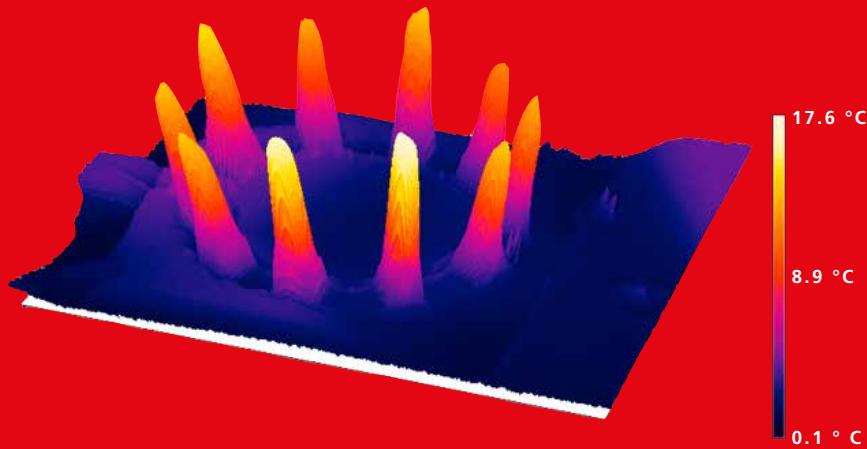
ENERGIEEFFIZIENTE LED-BELEUCHTUNG AUF DER BASIS VON GALLIUMNITRID

Der Halbleiter Galliumnitrid (GaN) bildet nicht nur die Grundlage hocheffizienter blauer und weißer Leuchtdioden (LEDs) und damit eines Großteils der Beleuchtung mithilfe von LEDs – mit ihm lässt sich auch die zum Netzbetrieb von LED-Lampen benötigte Leistungselektronik hinsichtlich Wirkungsgrad, Baugröße und Kosten verbessern. Auf Basis der GaN-auf-Si-Technologie des Fraunhofer IAF wurde ein kompakter Schaltwandler für LED-Leuchten aufgebaut. Damit konnte eine LED-Retrofit-Lampe mit einem, im Vergleich zu marktüblichen Modellen, doppelt so hohen Lichtstrom von 2032 lm und einer verbesserten Gesamteffizienz von 86 lm/W demonstriert werden.

Gegenwärtig wird etwa 20 % des weltweiten Stromverbrauchs für Beleuchtung aufgewendet. Durch den beachtlichen Anstieg des LED-Lichtstroms der letzten Jahre und der einhergehenden Kostenabnahme rückt die Vision der Allgemeinbeleuchtung auf LED-Basis in greifbare Nähe. Dieser Trend wird durch das Verbot der Glühlampe und das 2016 nachfolgende Verbot der Halogenlampe in der EU weiter verstärkt. Jedoch nutzen viele bestehende Leuchten noch die verbreiteten E14- und E27-Schraubsockel. Die Retrofit-Lampe für klassische Schraubsockel stellt deshalb einen wichtigen Schritt zur Einführung der LED-Beleuchtung dar. Der entscheidende Nachteil dieses Lampentyps liegt jedoch im geringen Gewicht und der geringen Größe, sowie der begrenzten Wärmeabfuhr, gut geeignet für heiße Glühwendeln, weniger geeignet für Leuchtdioden mit geringen maximal zulässigen Chiptemperaturen. Dies führt zu Gehäusetemperaturen aktueller LED-Retrofit-Lampen von über 80 °C mit noch deutlich höheren Chiptemperaturen. Gegenwärtig sind LED-Ersatzleuchten für 60-W-Glühbirnen mit einem Lichtstrom von 700 lm verfügbar, ein direkter Ersatz für 100-W-Birnen mit einem Lichtstrom von 1400 lm im Standard-E27-Formfaktor fehlt noch.

Der wichtigste Baustein einer solchen LED-Retrofit-Lampe ist das LED-Modul selbst. Da der Wirkungsgrad der LED mit etwa 0,25 % pro Grad Diodentemperatur abnimmt, ist eine effiziente Wärmeabfuhr der Schlüssel für helle und effiziente LED-Lampen. Am Fraunhofer IAF wurden daher effiziente vollkeramische AlGaN-LED-Module entwickelt. Diese bestehen aus Dünnschicht-LEDs im Keramikgehäuse, die mittels SnAg-Lot und Vakuumlöten auf laserstrukturierte AlN-Platinen mit einer Wärmeleitfähigkeit von über 170 W/m·K gelötet wurden. In Abb. 3 ist ein warm-weißes 3000 lm LED-Modul mit 20 W elektrischer Leistung dargestellt. Das Wärmebild (Abb. 2) zeigt einen Anstieg der LED-Temperatur von weniger als 15 K. Daraus ergibt sich ein Wärmewiderstand von nur 0,5 K/W.

Als zweiter wichtiger Baustein wird ein Schaltwandler benötigt, der die 230-V-Wechselspannung aus dem Stromnetz in geregelten, geglätteten Gleichstrom umsetzt. Gegenwärtige LED-Treiber beruhen auf Si-Metall-Halbleiter-Feldeffekt-Transistoren (MOSFET) mit Schaltfrequenzen bis zu mehreren 100 KHz. Jedoch bieten GaN-basierte Heterostruktur-Feldeffekttransistoren (HFET) herausragende Möglichkeiten für hocheffiziente Schaltwandler. Der Vorteil liegt dabei in einer geringeren Gate-Kapazität, die wiederum verringerte Schaltverluste und damit höhere



2

soldered on laser patterned AlN ceramic boards with thermal conductivity above 170 W/m·K (Fig. 3). This is done by using SnAg solders and vacuum plumbing systems. The thermal image (Fig. 2) indicates an LED temperature increase of less than 15 K above heatsink temperature, hence a thermal resistance of merely 0.5 K/W.

The second important building block is the power converter needed to transform the 230 AC voltage of the power grid into a regulated smooth low-voltage DC current. Commercial LED drivers are based on Si metal oxide semiconductor field effect transistor technology with switching frequencies up to several 100 kHz. However, GaN-based high electron mobility transistor (HEMT) possess outstanding properties for highly efficient switching converters. One advantage is a lower gate capacity which allows for reduced switching losses and increased frequencies. Since size and cost of an LED power converter is determined by the passive components, an increased switching frequency can lead to substantial size and cost benefits. A high breakdown voltage of more than 600 V required for 230 V power grid operation can be achieved in the off-state. On the other hand, low on-state resistances and high on-state currents are possible because of the high electron density at the AlGaN/GaN heterointerface and the high carrier mobility in the transistor channel. Furthermore, the GaN HEMT technology can operate at high temperatures, thus reducing the cooling requirements.

The AlGaN/GaN-on-Si HEMTs developed, fabricated and characterized at Fraunhofer IAF have been implemented in highly efficient, fast-switching power converters. High performance is demonstrated by the characterization of static- and dynamic

parameters and the comparison to commercial state-of-the-art silicon power devices. Compared to their Si-based counterparts, the GaN-devices achieve a factor of 3 lower static area specific on-state resistance $R_{ON} \times A$, and by a factor of 3 lower static on-state resistance times gate charge product $R_{ON} \times Q_G$. This opens the possibility for increased switching frequencies and allows reducing the size and cost of the passive L and C components required for energy storage in power converters.

The specific capabilities of these switches for solid state lighting applications are demonstrated in a compact GaN-based LED driver circuit capable of 20 V per 1 A with offline-isolated flyback topology, power factor correction and normally-off cascade. The galvanic isolation is particularly important at higher power levels and when aluminum heat sinks are used. Utilizing a new measurement setup, the power conversion efficiency of the LED driver has been determined. The Fraunhofer IAF demonstrator reveals an improved electrical conversion efficiency of 86 %. Compared to Si-based drivers from commercial high-end LED lamps, an improvement of up to 4 % is observed, still limited by the use of galvanic isolation.

Utilizing this driver, a LED retrofit lamp with an E27 socket for light bulb replacement has been realized. In Fig. 1 the luminous flux and efficacy of the Fraunhofer IAF demonstrator is compared to commercial high-end retrofit lamps. Spectral photometry measurements reveal that with the same lamp size a more than twice as high luminous flux of 2032 lm with an overall luminous efficacy of 86 lm/W is achieved. Compared to a standard 60 W light bulb, this provides a 2.8 times higher luminous flux and a 6.7 times improved efficacy at only 40 % power consumption.



3

2 The thermal analysis indicates an LED temperature increase of only 10 K for the Fraunhofer IAF LED module.

Aus dem Wärmebild ergibt sich eine um nur 10 K erhöhte LED-Temperatur für das LED-Modul des Fraunhofer IAF.

3 LED modules with 3000 lm at 20 W on an AlN ceramic board for improved high current and high temperature operation.

Für hohe Betriebsströme und Temperaturen optimierte LED-Module mit 3000 lm bei 20 W auf keramischer AlN-Platine.

Schaltfrequenzen erlaubt. Da Größe und Kosten von Schaltwandlern maßgeblich von ihren passiven Komponenten bestimmt werden, können durch eine erhöhte Schaltfrequenz erhebliche Kosten- und Baugrößenvorteile erzielt werden. Zusätzlich lässt sich die für den Netzbetrieb erforderliche Durchbruchsspannung von über 600 V im Sperrzustand erreichen. Im geschlossenen Zustand hingegen führt die hohe Elektronendichte an der AlGaN/GaN-Grenzfläche und die hohe Ladungsträgerbeweglichkeit im Kanal zu einem geringen Durchgangswiderstand und hohem Durchlassstrom. Zusätzlich kann die GaN-HEMT-Technologie bei hohen Temperaturen betrieben werden, was den Kühlauflauf reduziert.

Die am Fraunhofer IAF entwickelten, hergestellten und charakterisierten AlGaN/GaN-HEMTs auf Siliziumsubstraten wurden in hocheffiziente, schnell-schaltende Wandler implementiert. Die Charakterisierung der statischen und dynamischen Parameter zeigt im Vergleich zu marktüblichen Si-Leistungsbauarten überlegene Eigenschaften: So wird ein um den Faktor 3 niedriger spezifischer Durchlasswiderstand $R_{ON} \times A$ gemessen. Auch das Produkt mit der Gateladung $R_{ON} \times Q_G$ ist gegenüber entsprechenden Si-Bauteilen um den Faktor 3 reduziert. Dadurch werden höhere Schaltfrequenzen möglich, was die Kosten und die Baugröße der, für die Energiespeicherung notwendigen, passiven L- und C-Komponenten reduziert.

Um die spezifischen Vorteile dieser Schalttransistoren für die LED-Beleuchtung zu demonstrieren wurde ein kompakter GaN-basierten 20-V/1-A-LED-Treiber aufgebaut. Dieser verfügt über eine isolierte Sperrwandler-Topologie mit Phasenkorrektur und einer Inverterkaskade zur Ansteuerung von GaN-HEMTs. Die galvanische Trennung ist besonders bei höheren Leistungen erforderlich und wenn offene Aluminiumkühlkörper verwendet werden. Mithilfe eines neuen Messplatzes wurde der Wirkungsgrad verschiedener LED-Treiber bestimmt. Der Demonstrator des Fraunhofer IAF zeigt dabei eine verbesserte elektrische Konversionseffizienz von 86 %. Vergleicht man dies mit Si-basierten Wandlern aus hochwertigen kommerziellen LED-Lampen, so ergibt sich eine durch die verwendete galvanische Trennung begrenzte Verbesserung von bis zu 4 %.

Mithilfe dieses Schaltwandlers wurde eine LED-Retrofit-Lampe mit E27-Schraubsockel als Ersatz für Glühlampen aufgebaut. In Abb. 1 ist der Lichtstrom und der Gesamtwirkungsgrad des Demonstrators dargestellt und mit hochwertigen kommerziellen LED-Retrofit-Lampen verglichen. Spektrale Photometriemessungen ergaben einen mehr als doppelt so hohen Lichtstrom von 2032 lm bei einer Gesamteffizienz von 86 lm/W. Im Vergleich zur einer klassischen Glühlampe ergibt sich ein um den Faktor 2,8 erhöhter Lichtstrom und eine 6,7-fach höhere Gesamteffizienz bei nur 40 % Stromverbrauch.

SEMICONDUCTOR SENSORS

CHRISTOPH E. NEBEL

TEL. +49 761 5159-291

CHRISTOPH.NEBEL@IAF.FRAUNHOFER.DE

VOLKER CIMALLA

TEL. +49 761 5159-304

VOLKER.CIMALLA@IAF.FRAUNHOFER.DE



HALBLEITERSENSOREN



»Aktuell arbeite ich an sehr sensitiven Magnetfeldsensoren aus Diamant, mit denen es erstmals möglich ist, die Aktivität von einzelnen Neuronen zu detektieren. Dieser Sensor könnte beispielsweise in der Alzheimer-Forschung helfen, wichtige Erkenntnisse über die noch unheilbare Krankheit zu gewinnen und sie vielleicht eines Tages zu heilen.«

Claudia Widmann, die in am Fraunhofer IAF entwickelten Reaktoren hochreine Diamanten herstellt.

»At the moment, I am working on very sensitive magnetic field sensors made of diamond which make it possible to detect the activity of single neurons. This sensor could help Alzheimer research gather important insights into the still incurable disease and maybe someday help heal it.«

Claudia Widmann, who is producing highly purified diamond in reactors developed at Fraunhofer IAF.

DIAMONDS GLOW WITH HIGH PERFORMANCE

DIAMANT GLÄNZT MIT HÖCHSTLEISTUNG

High performance lasers and high power electronics have one thing in common: they all require extremely efficient components based on materials that withstand the constant high performance. One material that meets these requirements due to its great thermal conductivity, its extraordinary hardness and its broadband optical transparency is diamond.

When dealing with precise labelling, cutting or welding of objects, diamond lenses show significant advantages to commonly used quartz lenses: With heat conductivity approximately 2000 times higher than that of quartz, lenses made from diamond remain inherently stable, also when exposed to high temperatures, without any impact on the focus point of the laser beam. In future, the special properties of diamond shall also be used for power electronics. Hybrid components that are connected with semiconductors, shall meet the challenge of heat dissipation in microelectronic power components – thereby allowing to minimize the devices and external cooling components and to increase the overall efficiency.

At Fraunhofer IAF we produce ultra-pure synthetic diamond through plasma enhanced chemical vapor deposition in our in-house developed reactors. In the past years we succeeded in improving the pureness of the diamond, as well as the efficiency of the production process through the fast and parallelized growth of diamond.

Due to its extraordinary physical properties, ultra-pure single- and poly-crystalline diamond is well-suited for components that need to work reliably under extreme conditions:

- Material processing:
Diamond lenses for high-energy laser systems
- Energy:
Diamond spheres for laser-induced nuclear fusion
- Measurement technology:
Micro- and nano-sensors for the detection of hazardous substances
- High power electronics:
Power transistors based on diamond substrates



Hochleistungslaser und Hochleistungselektronik haben eines gemeinsam: Sie benötigen extrem leistungsfähige Bauteile aus Materialien, die hohen Leistungen dauerhaft stand halten. Ein Material, das aufgrund seiner guten thermischen Leitfähigkeit, Härte und breitbandigen optischen Transparenz diesen Anforderungen gerecht wird, ist Diamant.

Wenn es darum geht, Werkstücke mit Hochleistungslasern präzise zu beschriften, zu schneiden oder zu schweißen, zeigen Diamantlinsen deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Quarzlinsen: Aufgrund ihrer etwa 2000-fach höheren Wärmeleitfähigkeit bleiben die Linsen aus Diamant auch bei höchsten Temperaturen formstabil, sodass der Fokuspunkt des Laserstrahls nicht beeinflusst wird. Die besonderen Eigenschaften von Diamant will man sich zukünftig auch in der Leistungselektronik zu Nutzen machen. Mit Halbleitern verbundene hybride Bauelemente sollen die Wärmeabfuhr in mikroelektronischen Leistungsbauelementen regulieren. Somit können Bauteile zukünftig miniaturisiert, externe Kühelemente verkleinert und insgesamt die Effizienz gesteigert werden.

Dafür stellen wir am Fraunhofer IAF mittels Plasma-gestützter chemischer Gasphasenabscheidung in eigens entwickelten Reaktoren hochreinen synthetischen Diamant her. In den letzten Jahren konnte hierbei die Reinheit der Diamanten sowie die Wirtschaftlichkeit des Herstellungsverfahrens mit schnellem und parallelisiertem Diamantwachstum deutlich verbessert werden.

Hochreiner ein- und polykristalliner Diamant eignet sich aufgrund seiner herausragenden physikalischen Eigenschaften für Bauteile, die unter extremen Bedingungen zuverlässig funktionieren müssen:

- Materialbearbeitung:
Diamantlinsen für Hochenergie-Lasersysteme
- Energie:
Diamantkugeln für laserinduzierte Kernfusion
- Messtechnik:
Mikro- und Nanosensoren zum Nachweis von Gefahrstoffen
- Hochleistungselektronik:
Leistungstransistoren auf Diamant-Substraten

DIAMOND LENSES FOR HIGH POWER LASERS

NICOLA LANG

TEL. +49 761 5159-281

NICOLA.LANG@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – DIAMOND LENSES

- REFRACTIVE INDEX: 2.4
- THERMAL EXPANSION: 10^{-5} K^{-1}
- DIELECTRIC CONSTANT: 5.68
- ABSORPTION COEFFICIENT (MIR): $< 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



In materials processing using laser, transmissive optical components such as lenses made from quartz often pose a weak point due to steadily increasing energy densities of near-infrared solid state lasers (powers $> 1 \text{ kW}$). Thermal drift due to absorption leads to focus shifts and thermal aberrations diminish beam quality. Therefore, a new lens material is needed that withstands the high energy impact and does not affect the beam quality. Diamond has exceptional properties, such as high thermal conductivity and low absorption, that lenses made from it meet those demands.

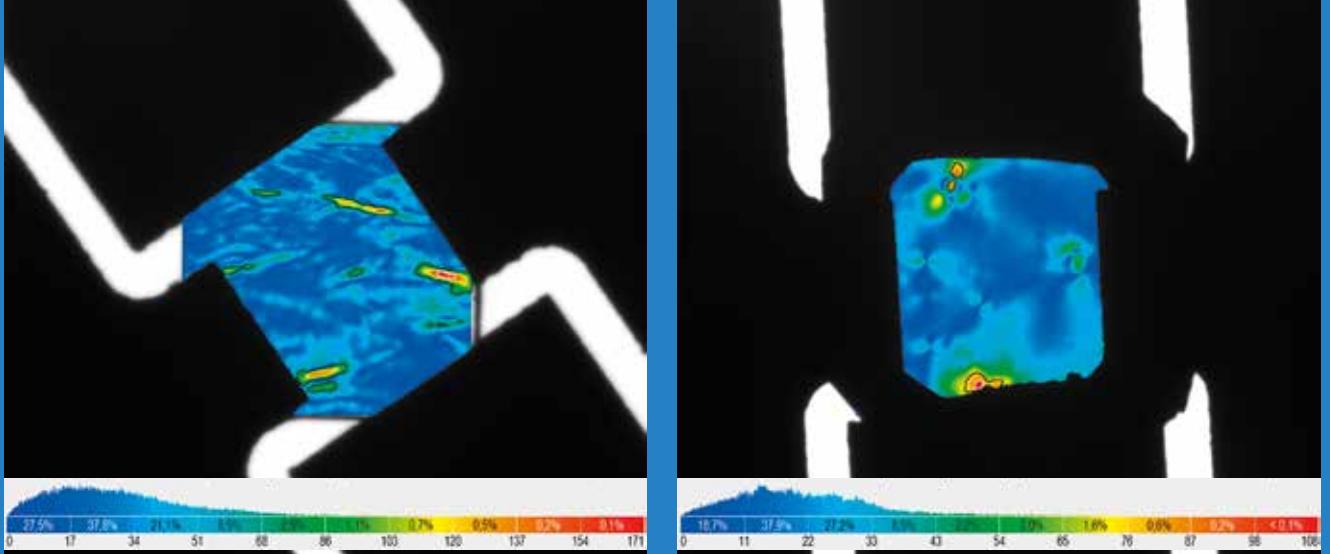
Due to its outstanding physical properties, single-crystalline diamond is a promising material for numerous emerging applications, among which are quantum devices and high power electronics. Another application for this material is as optical components of high power lasers for materials processing. The annual turnover in the field of materials processing by laser, namely cutting, welding and inscribing, is $> 7 \text{ bn. €}$, and continuously growing. The power of these lasers is steadily increasing, having exceeded 10 kW continuous wave power in 2009 already. This leads to a demand for lenses with high durability. Up to now, optical materials such as quartz have been employed due to low absorption and easy manufacturing. However, already a thin film of deposit of oil mist or processed material on the lens surface can cause the lens to fail and not meet the requirements anymore. The increased absorption leads to thermal lensing effects that change the focus length and diminishes the beam quality. There have been approaches by other groups to compensate these effects by using tunable lens systems, but they have been dismissed due to risk of higher failure rates. When using diamond as a lens material, thermally induced focus shifts will not occur, as the thermal conductivity of diamond is approximately 2000 times higher than that of quartz. In addition, diamond has a high refractive index (2.4) and low density (3.5 g/cm^3), allowing for thin, lightweight optics for highly dynamic applications.

DIAMANTLINSEN FÜR HOCHLEISTUNGSLASER

In der laserbasierten Materialverarbeitung stellen transmissive optische Komponenten wie Quarzlinsen aufgrund steigender Energiedichten von nah-infraroten Festkörperlaser (Leistung > 1 kW) oft einen Schwachpunkt dar. Die durch Absorption entstehende thermische Drift führt zu Fokusverschiebung und thermische Abberation verringert die Strahlqualität. Daher ist ein neues Linsenmaterial nötig, das dem hochenergetischen Licht standhalten kann und keinen Einfluss auf die Strahlqualität hat. Die außergewöhnlichen Eigenschaften von Diamant, wie seine hohe Wärmeleitfähigkeit und niedrige Absorption, machen ihn zu einem idealen Linsenmaterial.

Die überragenden physikalischen Eigenschaften von einkristallinem Diamant machen ihn zu einem vielversprechenden Material für eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. für Quantenbauelemente oder für die Leistungselektronik. Ein weiteres Einsatzgebiet von Diamant sind Hochleistungslaser, die zur Materialverarbeitung eingesetzt werden. Der Jahresumsatz im Bereich der laserbasierten Materialverarbeitung, die das Schneiden, Schweißen und Beschriften einschließt, beträgt über 7 Mrd. € und nimmt kontinuierlich zu. Die ständig wachsende Leistung solcher Laser hat bereits im Jahr 2009 eine Dauerstrich-Leistung von 10 kW überschritten. Die Folge ist eine große Nachfrage für Linsen mit hoher Lebensdauer. Bis dato sind optische Materialien wie Quarz wegen ihrer geringen Absorption und einfachen Herstellung eingesetzt worden. Allerdings kann bereits ein dünner Film von Ölnebelablagerungen oder prozessiertem Material auf der Linsenoberfläche diese unbrauchbar machen: Die erhöhte Absorption bewirkt thermische Linseneffekte, die die Fokallänge verändern und die Strahlqualität verringern. Bemühungen anderer Forschergruppen, solche Effekte durch variable Linsensysteme zu kompensieren, sind wegen des Risikos höherer Störungsraten abgewiesen worden. Der Einsatz von Diamant als Linsenmaterial hingegen verhindert thermisch induzierte Fokusverschiebungen, da die Wärmeleitfähigkeit von Diamant etwa 2000 Mal höher ist als die von Quarz. Darüber hinaus besitzt Diamant einen hohen Brechungsindex von 2,4 und eine geringe Dichte von 3,5 g/cm³, was die Fabrikation dünner, leichter Optiken für hochdynamische Anwendungen ermöglicht. Für diese Anwendung sind zwei Arten von Diamant leicht erhältlich: polykristallines und einkristallines Material. Idealerweise sollte das Linsenmaterial niedrige Absorption sowie eine geringe Dichte an polarisierenden Defekten aufweisen.

Obwohl polykristalliner Diamant auf größere Flächen mit bis zu 6 Zoll im Durchmesser deponiert werden kann (8 x 8 mm² erreichen die größten kommerziell verfügbaren Einkristalle), ist seine Absorption höher als bei einkristallinem Diamant. Dies liegt an den Korngrenzen, die sich besonders bei Wellenlängen von über 1 µm, der typischen Faserlaserwellenlänge, bemerkbar machen. Darüber hinaus machen Lichtstreuung, Phasendeformation und Polarisationseffekte polykristallines Material für Laseranwendungen unbrauchbar.



1

There are two types of diamond readily available for this purpose, namely poly-crystalline and single-crystalline material. Ideally, the lens material should have low absorption as well as a low density of polarising defects. Although poly-crystalline diamond can be deposited on large areas up to 6" in diameter ($8 \times 8 \text{ mm}^2$ are among the largest single crystals that are commercially available), it has a higher absorption than single-crystalline diamond due to grain boundaries, especially in the wavelength regions above $1 \mu\text{m}$, which is the typical wavelength of fibre lasers. Furthermore, light scattering, phase deformation and polarisation defects make poly-crystalline material unsuitable for laser applications.

At Fraunhofer IAF, synthetic diamond is fabricated on commercially available high pressure high temperature synthesized seed crystals using a low pressure, microwave plasma enhanced chemical vapour deposition (MWPE CVD) process. The standard deposition parameters allow growth rates of up to $2 \mu\text{m/h}$. For the lens application, thick diamond layers of up to 1 mm are necessary, so for profitable fabrication, the growth rate per area has to be maximised. In recent years, several groups have shown that fast growth of diamond and simultaneous growth of multiple substrates is possible through the formation of a homogenous large area plasma. Our aim is to use this technique to achieve feasible manufacturing time and quality of diamond for the designated application. The substrates are polished and cleaned prior to the deposition process. They are then placed in the ellipsoidal reactor. To reduce the number of polishing induced defects, the samples are treated with an H_2/O_2 plasma etching step. The formation of twins on the surface can thus be prevented, which would otherwise make the lens polishing step impossible.

In this work, the standard growth parameters were optimized towards a higher plasma power density in a large area plasma, achieving higher growth rates of up to $10 \mu\text{m/h}$ without the addition of nitrogen. Using a hydrogen/methane gas admixture, we applied gas pressures of typically 400 mbar, higher microwave-power of about 3.3 kW and enhanced substrate cooling. Typically, only one substrate is placed in the reactor at a time. The increased plasma area, however, now allows for a parallel growth of up to 20 substrates. After overgrowth, the CVD diamonds are removed from the substrate by a laser cutting/polishing treatment. The resulting free-standing epitaxial layers are optically characterised towards birefringence and optical path length difference using a polariscope.

The measurements show that compared to the substrates which show random polarisation, the epitaxial layers exhibit large areas that show no change in polarisation. Also, a small number of stress inducing defects are clearly visible, locally causing birefringence properties. These defects also induce an optical path length difference. The layer thicknesses of the substrate and the epitaxial layer are 300 μm and 500 μm , respectively. However, for 80 % of the measured area, the substrate showed an optical path length difference of almost 50 nm, whereas the grown layers only show a change in path length of 30 nm for the same area.

This shows that we have been able to improve the optical properties of the diamond material compared to the substrate's. In the final laser setup, a lens made from this material will therefore be able to focus the laser with only minimal stress-induced distortion, making this epitaxial diamond an attractive alternative to quartz lenses.



2

1 Polariskeope measurements (conducted at Fraunhofer ILT) on a commercially available substrate (300 µm) showing an optical path length difference of 50 nm for 80 % of the measured area (left) and on an epitaxially grown diamond layer (500 µm) showing only 30 nm path length difference for the same measured area (right).

Polariskopmessungen (durchgeführt am Fraunhofer ILT) an einem kommerziell erhältlichen Substrat (300 µm) zeigen einen Gangunterschied von 50 nm bei 80 % der gemessenen Fläche (links) während an einer epitaktisch gewachsenen Diamantschicht (500 µm) nur 30 nm Gangunterschied bei gleicher Fläche gemessen werden (rechts).

2 Fast and parallel growth of seven diamond samples, showing the samples during the CVD plasma process (left) and after growth (right).

Schnelles und paralleles Wachstum von sieben Diamantproben während des CVD-Plasmaprozesses (links) und nach dem Wachstum (rechts).

Am Fraunhofer IAF wird synthetischer Diamant auf kommerziell verfügbaren, durch Hochdruck-Hochtemperatursynthese hergestellten Keimkristallen mittels mikrowellengestützter Gasphasenabscheidung (MWPE CVD) bei niedrigem Druck gewachsen. Die Standardabscheideparameter ermöglichen Wachstumsraten von bis zu 2 µm/h. Für Linsen sind dicke Diamantschichten von bis zu 1 mm nötig. Dies bedeutet, dass für wirtschaftliche Fertigung die Wachstumsrate pro Fläche maximiert werden muss. In den letzten Jahren haben verschiedene Forschergruppen gezeigt, dass schnelles Diamantwachstum bei simultanem Überwachsen mehrerer Substrate durch die Formierung eines großflächigen, homogenen Plasmas möglich ist. Unser Ziel ist die Implementierung dieser Technologie, um eine realisierbare Fabrikationszeit und Qualität des Diamanten für die vorgesehene Anwendung zu erreichen. Die Substrate werden vor der Abscheidung poliert und gereinigt, dann in den Ellipsoidreaktor geführt. Ein H₂/O₂-Plasmaätzschritt soll die Zahl politurinduzierter Defekte in den Proben reduzieren. Somit kann Zwillingsbildung auf der Oberfläche, was eine Politur der Linse unmöglich machen würde, verhindert werden.

Dabei wurde die Optimierung der Standardwachstumsparameter hin zu höherer Leistungsdichte in großflächigen Plasmen erreicht, was eine Wachstumsratenerhöhung bis 10 µm/h ohne Zugabe von Stickstoff bedeutet. Unter Verwendung eines Wasserstoff/Methangasgemisches wurden Drücke von typischerweise 400 mbar, höhere Mikrowellenleistung (ca. 3,3 kW) und verstärkte Substratkühlung eingestellt. Üblicherweise kann lediglich ein Substrat eingebaut werden, doch die vergrößerte Plasmafläche ermöglicht ein paralleles Wachstum auf bis zu 20 Substraten. Nach der Abscheidung werden die CVD-Diamanten durch Laserschneiden bzw. Politur vom Substrat getrennt. Die resultierenden freistehenden epitaktischen Schichten werden mittels Polariskop hinsichtlich Doppelbrechung und optischer Weglängendifferenz charakterisiert.

Messungen zeigen, dass die epitaktischen Schichten große Bereiche ohne Polarisationsvariation aufweisen, die Substrate dagegen willkürliche Polarisierung. Auch sind eine kleine Anzahl stress-induzierender Defekte deutlich sichtbar, welche lokal doppelbrechend wirken und eine optische Weglängendifferenz induzieren. Die Schichtdicken des Substrats und der epitaktischen Schicht betragen 300 µm bzw. 500 µm. Allerdings beträgt die optische Weglängendifferenz im Fall der Substrate bei Vermessung von 80 % der Fläche fast 50 nm, im Falle der gewachsenen Schichten hingegen für denselben Prozentsatz an Flächenvermessung lediglich 30 nm.

Die optischen Eigenschaften der Diamantschichten im Vergleich zum Substrat konnten somit deutlich verbessert werden. Im fertigen Laseraufbau wird eine Linse aus diesem Material in der Lage sein, den Laserstrahl mit nur geringen spannungs-induzierten Störungen zu fokussieren. Dadurch wird epitaktisch hergestellter Diamant zu einer attraktiven Alternative zu Quarzlinse.

DIAMOND-BASED RESONATORS FOR HIGH-FREQUENCY APPLICATIONS

DIMITRE IANKOV

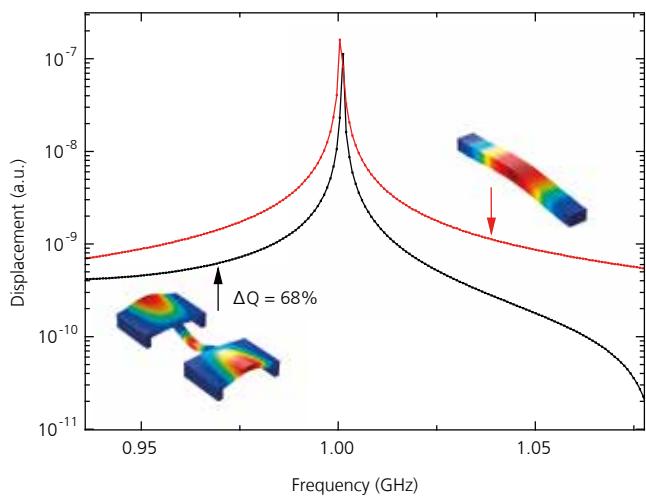
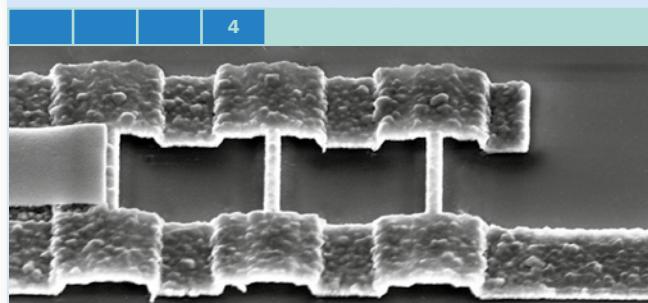
TEL. +49 761 5159-514

DIMITRE.IANKOV@IAF-EXTERN.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – DIAMOND RESONATOR

- FREQUENCY RANGE: 0.3 – 3.0 GHz
- QUALITY FACTOR AT 1 GHz: 10^5
- POWER > 20 dBm
- OPTICAL MODULATION

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Simulated frequency response of a suspended flexural resonator beam supported by microplates with matched fundamental frequencies showing an increase in quality factor compared to a doubly-clamped beam with rigid support.

Simulierte Frequenzspektrum eines freischwebenden Resonators bestehend aus einem an zwei Mikroplatten aufgehängten Balken mit angepassten Resonanzfrequenzen. Der Anstieg der Güte im Vergleich zu doppelseitig fest gespannten Balken ist deutlich erkennbar.

With the advent of modern wireless communication standards exploiting the ultra high frequency range around 0.3 – 3 GHz, the demand for on-chip frequency-selective components, compatible with standard silicon process technologies, became prominent. Several key properties inherent to nano-crystalline diamond have proven particularly advantageous for targeting very high frequency-quality-factor products of microelectromechanical devices with application in high frequency filters – high acoustic velocity, high thermal conductivity and moderate phonon scattering losses.

Micromechanical resonators suffer a variety of energy dissipation mechanisms, among which viscous gas damping, thermoelastic damping and clamping losses are the most prominent. Operation under high vacuum and the employment of a material with advanced mechanical properties like diamond effectively suppresses the first two dissipation sources, making clamping losses the dominant loss factor to cope within the course of achieving high frequency-quality-factor products in the ultra high frequency range. Moreover, the effect of the support tends to grow with increasing fundamental frequency of a resonating beam leading to an inverse relationship between Q-factor and frequency.

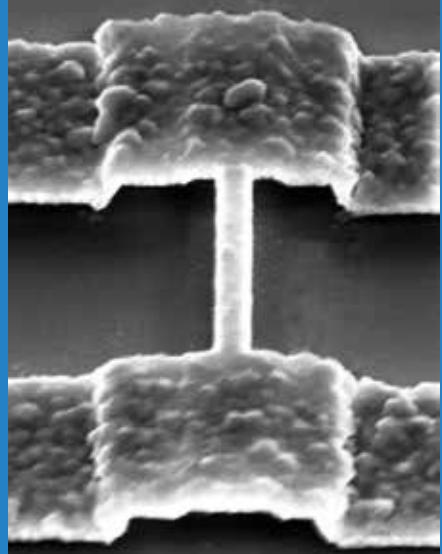
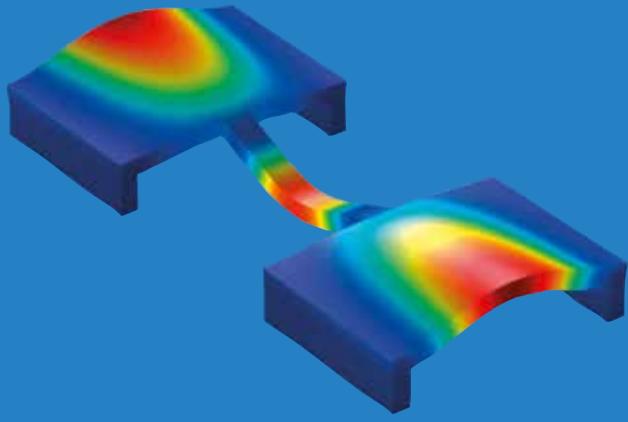
Parametric mechanical pumping is considered as an option to address clamping losses in nanometer-scale flexural resonators. Devices which utilize this concept are currently under development at Fraunhofer IAF. The resonator's support is replaced by suspended microplates, which exhibit the same fundamental frequency as the target frequency of the resonator beam (Fig. 2). While the supporting microplates may not feature a high quality factor by themselves, they offer an energy path for effective pumping of the beam. The effect of matching the fundamental frequencies of the individual building parts of the device is illustrated in Fig. 1. Here, the results on finite element method (FEM) simulations are displayed, showing the coupled flexural vibration mode of two suspended microplates joint by a doubly clamped beam. The clamping loss limited quality factor exceeds values up to 3×10^5 at 1 GHz.

DIAMANT-BASIERTE RESONATOREN FÜR HOCHFREQUENZ-ANWENDUNGEN

Mit der Einführung von Mobilfunkstandards im »ultra high frequency«-Band von 0,3 bis 3 GHz entsteht der Bedarf an integrierbaren frequenzselektiven Komponenten, deren Herstellung mit Prozessen aus der konventionellen Silizium-Technologie kompatibel ist. Die mechanischen Eigenschaften des nanokristallinen Diamanten, insbesondere seine hohe Schallgeschwindigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit und seine moderaten Verluste durch Phonon-Phonon-Wechselwirkungen, bieten die entscheidenden Vorteile, um der Forderung nach hohen Frequenz-Güte-Kennzahlen von mikroelektromechanischen Bauelementen mit Anwendungen als Hochfrequenzfilter gerecht zu werden.

Die Güte von mikromechanischen Resonatoren wird von verschiedenen Verlustmechanismen beeinflusst, von denen viskose Luftdämpfung, thermoelastische Dämpfung und Aufhängungsverluste am starren Ende den stärksten Einfluss haben. Die beiden erstgenannten Verlustquellen können durch Betrieb in Hochvakuum und durch Anwendung von Materialien mit herausragenden mechanischen Eigenschaften – wie Diamant – stark reduziert werden. Im Zuge der weiteren Optimierung hin zu höchsten Frequenz-Güte-Kennzahlen im UHF-Band gilt es demnach die Aufhängungsverluste zu minimieren. Grundsätzlich wächst mit steigender Frequenz die Auswirkung von Aufhängungsverlusten. Demnach ist die Güte umgekehrt proportional zur Resonanzfrequenz. Ein Ansatz zur Minimierung von Aufhängungsverlusten bei in Flexuralmoden betriebenen Resonatoren ist das parametrische mechanische Pumpen. Am Fraunhofer IAF werden neuartige Bauelemente entwickelt, die dieses Konzept nutzen. Die starre Aufhängung eines Resonatorbalkens wird durch eine freischwebende Mikroplatte ersetzt, welche die gleiche Resonanzfrequenz besitzt wie der Balken selbst (Abb. 2). Die Mikroplatte braucht hierbei keine besonders hohe Güte zu erreichen. Vielmehr bietet diese einen Pfad zur Energieübertragung hin zum Balken, wodurch ein mechanisches Pumpen möglich wird. Der Effekt, den die Anpassung der Resonanzfrequenzen der einzelnen Bestandteile des Resonators bewirkt, ist in Abb. 1 ersichtlich. Hier wird durch Finite-Elemente-Methoden-Simulation das Spektrum eines gekoppelten Schwingungssystems, bestehend aus zwei Mikrobalken und einer doppelseitig gespannten Brücke, simuliert. Die durch Aufhängungsverluste bestimmte obere Grenze für die Güte erreicht dabei Werte von bis zu 3×10^5 bei 1 GHz. Elektrisch leitender Bor-dotierter Diamant als mechanisch aktive Schicht bietet außerdem weitere Funktionalitäten. Insbesondere werden kontaktlose elektrostatische Anregungsmechanismen ermöglicht, welche Metallelektroden überflüssig machen und die damit verbundenen Einbußen an mechanischen Eigenschaften vermeiden.

Der Betrieb mechanischer Resonatoren bei hohen Frequenzen unter Anwendung von Flexuralmoden erfordert eine erhebliche Miniaturisierung des Bauelements bis in den Submikrometerbereich. Dabei steigt die Komplexität des Herstellungsprozesses enorm. Der am Fraunhofer IAF eingesetzte Prozess vereinigt daher konventionelle Verfahren für den Mikrometerbereich, nämlich UV-Projektionslithografie und reaktives Ionenätzen, mit neuartigen Techniken mit höherer



2

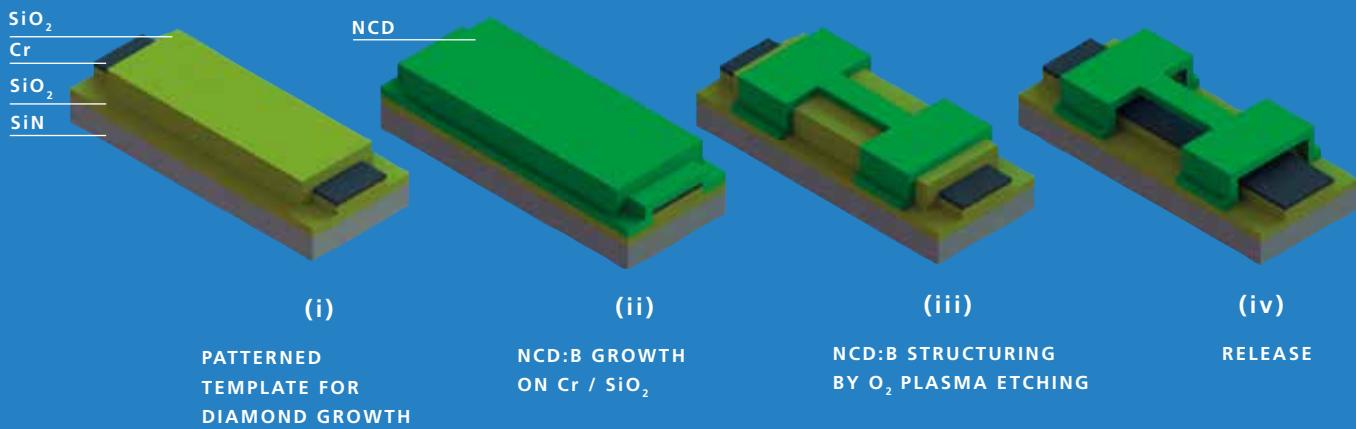
The employment of conductive boron-doped nano-crystalline diamond as structural material bears additional functionality, allowing for the realization of contactless electrostatic excitation schemes, thereby mitigating the need for metal electrode layers and the drawbacks in mechanical behaviour associated with heterostructures.

The targeted high frequency range of operation assumes a significant downscaling of the dimensions of a flexural resonator to the sub-micrometer range, which increases the complexity of device fabrication drastically. Therefore, the process being proposed here includes conventional micrometer-scale (e. g. ultraviolet projection lithography and reactive ion etching) as well as submicrometer patterning techniques, in particular electron beam lithography and focused ion beam milling to define the most critical nanometer-scale features.

Fig. 3 presents the process flow used for the fabrication of boron-doped nano-crystalline diamond (NCD:B) suspended resonators with a target fundamental vibration resonance at 1 GHz. The process begins with deposition of a 300 nm thick silicon nitride insulating layer on a Si(100) substrate, followed by 100 nm silicon oxide utilized as diamond growth underground and a 50 nm thick chromium coating. The bottom electrode (Cr) is patterned by submicron-scale resolution projection lithography followed by wet chemical etching. Then, a second 150 nm thick silicon dioxide layer is deposited and patterned by projection lithography and sulfur hexafluoride plasma etching resulting in a small silicon oxide structure on top of the bottom electrode. This structure serves as sacrificial layer between the bottom electrode and the suspended diamond microplates. Next, a 100 nm thick

conductive boron-doped nano-crystalline diamond film is grown in a microwave-assisted chemical vapour deposition reactor employing conventional hydrogen/methane plasma. The initial nucleation is achieved by nano-diamond seeding in an ultrasonic bath using a proprietary hydrogen-terminated colloid solution with an average particle size of 3 nm. A methane content of 2 % and substrate temperature of 650 °C are maintained during the diamond growth process. Boron incorporation is achieved by adding trimethylboron to the gas phase with a concentration of 5000 ppm, resulting in a boron doping of diamond of $\sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Afterwards, top electrode contact pads from Ni/Au/Ti are fabricated by a lift-off process. The suspended microplates – devices' top electrodes – are defined via bi-layer electron beam lithography and subsequent lift-off metallization, yielding the desired positive tone Ti masking layer. Afterwards, diamond is patterned by highly anisotropic oxygen plasma etching. Finally, the silicon dioxide sacrificial layer as well as the Ti mask are removed by using a buffered oxide etch.

A device of this kind, with the bottom electrode removed, is presented in Fig. 2. The same technological process may be employed to fabricate a variety of even more complicated structures. With electron beam lithography no physical mask is needed, which significantly increases the flexibility of the process flow. In further work, the diamond microbeam is separated in the middle by a nanoscale gap. By applying a voltage across said gap and movement of the beam halves relative to each other a field emission current is rapidly switched on and off. The aim of this development is to realize a fast electromechanical switch or a high frequency filter with applications in mobile communication.



3

2 Finite element method (FEM) simulation of the fundamental vibration mode shape and scanning electron microscope (SEM) micrograph of suspended boron-doped diamond flexural resonators.

Finite-Elemente-Methoden-Simulation der fundamentalen Schwingungsmoden und Raster-elektronenmikroskop-Aufnahme eines freischwebenden Bor-dotierten Diamant-basierten Resonatorbalkens.

3 Process flow: orthogonal cross-sections of two neighboring microplates.

Prozessablauf: orthogonale Querschnitte an zwei benachbarten Mikroplatten.

Auflösung, insbesondere Elektronenstrahlolithografie und fokussiertes Ionenstrahlschneiden, speziell für die Definition von kritischen Strukturen auf der Nanometerskala.

Abb. 3 zeigt den Prozessablauf für die Herstellung von freischwebenden Resonatoren aus Bor-dotiertem Diamant (NCD:B) mit Resonanzfrequenzen um 1 GHz. Anfangs wird eine isolierende Siliziumnitrid-Schicht von 300 nm ganzflächig auf Si(100)-Substrat abgeschieden, gefolgt von 100 nm Siliziumdioxid als Zwischenschicht für das Diamantwachstum und eine 50 nm dicke Chrombeschichtung. Die untere Elektrode (Cr) wird mittels Projektionslithografie mit Auflösung im Submikrometerbereich strukturiert und nasschemisch geätzt. Anschließend wird eine zweite 150 nm dicke Siliziumdioxidschicht abgeschieden, welche ebenfalls durch Projektionslithografie strukturiert und mittels Schwefelhexafluorid-Plasma geätzt wird. Dadurch bleiben kleine Strukturen aus Siliziumdioxid, die als Opferschicht zwischen der unteren Elektrode und der freischwebenden Diamantmikroplatte dienen. Als nächstes wird 100 nm leitender Bor-dotierter nanokristalliner Diamant in einem Reaktor für chemische Gasphasenabscheidung gewachsen. Dabei kommt konventionelles Wasserstoff-Methan-Plasma zum Einsatz. Die Nukleationsschicht wird durch Beschichten mit einer intern entwickelten Wasserstoff-terminierten Kolloidalösung mit mittlerer Partikelgröße von 3 nm im Ultraschallbad erreicht. Während des Wachstumsprozesses wird ein Methangehalt von 2 % und eine Substrattemperatur von 650 °C aufrechterhalten.

Der Einbau von Bor erfolgt in der Gasphase durch Hinzufügen von Trimethylboran mit einer Konzentration von 5000 ppm, woraus sich eine Bordotierung in Diamant von $\sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ergibt. Anschließend werden Kontaktflächen für die obere Elektrode aus Ni/Au/Ti mittels eines Lift-off-Prozesses hergestellt. Die freischwebenden Mikroplatten (obere Elektroden) werden durch Zweisichten-Elektronenstrahlolithografie definiert, gefolgt von einer Lift-off-Metallisierung. Als Ergebnis erhält man die gewünschte Positivmaske aus Titan. Die Diamantschicht wird hoch anisotrop im Sauerstoff-Plasma geätzt. Schließlich werden sowohl die Siliziumdioxid-Opferschicht als auch die Titanmaske in gepufferter Oxidätze entfernt.

Ein fertiges Bauelement mit entfernter unterer Elektrode ist in Abb. 2 dargestellt. Dieser technologische Prozess kann auch für die Herstellung von weitaus komplexeren Geometrien verwendet werden. Durch den Einsatz von Elektronenstrahlolithografie entfällt der Bedarf an einer physischen Maske, was die Flexibilität des Prozesses wesentlich verbessert. In weiterführenden Arbeiten wird der Diamant-Mikrobalken in seiner Mitte durch einen Nanospalt getrennt. Durch Anlegen einer Spannung über diesen Spalt und eine Bewegung der Balkenhälften relativ zueinander wird ein Feldemissionstrom schnell ein- und ausgeschaltet. Ziel dieser Entwicklung ist die Realisierung eines schnellen elektromechanischen Schalters bzw. eines Hochfrequenzfilters mit Applikationen im Mobilfunk.

GRAPHENE – THE THINNEST MATERIAL FOR ELECTRODES

RENÉ HOFFMANN

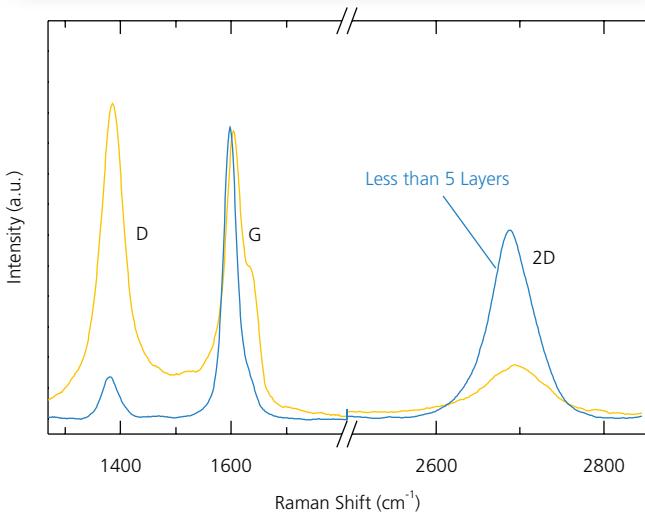
TEL. +49 761 5159-488

RENE.HOFFMANN@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – GRAPHENE

- THICKNESS: 3.35 Å
- DENSITY: 77 ng/cm²
- ELECTRICAL CONDUCTIVITY: 10⁶ Ω·cm
- ABSORPTION OF RED LIGHT: 2.3 %

TECHNOLOGY READINESS LEVEL



1 Graphite exfoliation to graphene by electrochemical hydroge-
nation (blue) leads to a significant reduction of defects, expressed
by a low ratio of the D to the G peak, compared to exfoliation via
Graphene oxide (yellow). The symmetry and narrow width of the 2D
peak indicates graphene flakes of less than 5 layers thickness.

Elektrochemische Expansion von Grafit zu Graphen mittels Hydrie-
rung (blau) führt zu einer signifikanten Reduktion von Defekten im
Vergleich zur konventionellen Expansion über Graphenoxid (gelb),
was sich in einem niedrigen Verhältnis der Raman-Linien D zu G aus-
drückt. Aus der Symmetrie und Schmalbandigkeit der 2D-Linie ergibt
sich, dass die Graphenflocken aus weniger als 5 Lagen bestehen.

Rarely has a new material impacted on science as graphene, the single atomic layer of carbon and the thinnest of all materials. After several years of extremely productive but mostly divergent research, it is now time to determine which of the many ideas from basic science have the potential to make the transition to applications. Fraunhofer IAF contributes convergent, applied graphene research with a focus on the combination of this new material with some of the existing III-V compound semiconductor devices.

After a single atomic layer of graphite was catapulted from being a mere theoretical construct with no practical significance to being conceived as a »wonder material« over night, numerous potential applications for this material have surfaced. Soon, however, realization hit that even though it is possible to produce and handle graphene, it still remains a challenge to do this on an industrial level. To date, many routes to applications for graphene remain blocked because a competitive ratio of price and performance of graphenic materials has not yet been achieved. The development of manufacturing and processing technologies is therefore a key enabling factor for innovation based on graphene and a self-evident first step in the applied graphene research at Fraunhofer IAF.

Two fundamentally different approaches for the production of graphenic materials are adopted. The first is the synthesis of wafer scale graphene in a chemical vapor deposition process. This includes the development of industry-compatible technology for graphene deposition and transfer. The goal is the scalable combination of graphene with III-V compound semiconductor devices. One example is the use of graphene as a virtually massless electrode for piezoelectric resonators in mobile communication front ends. These resonators would theoretically perform best if no electrode at all was required. The closest one can get to »no electrode at all« is an electrode with mere atomic thickness: a graphene electrode. Here one of the unique properties of graphene becomes important: that even as a single atomic layer it is still remarkably electrically

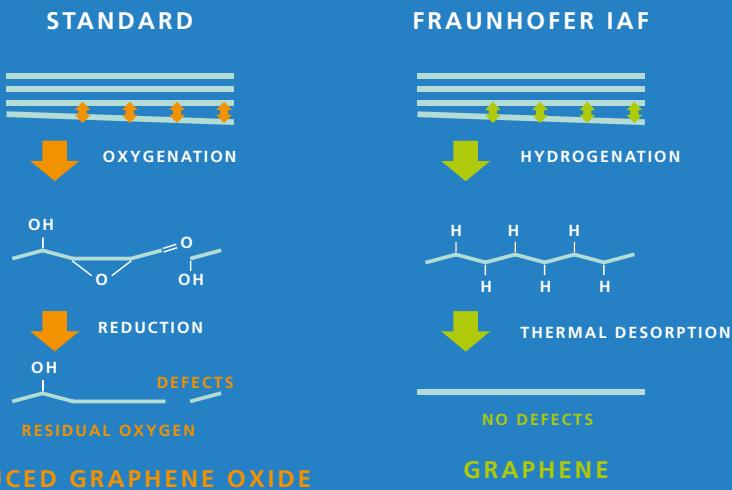
GRAPHEN – DAS DÜNNSTE ELEKTRODEN-MATERIAL

Nur selten hat in der Wissenschaft ein neues Material derart für Aufsehen gesorgt wie Graphen, eine Atomlage aus Kohlenstoff und das dünste aller Materialien. Nach Jahren extrem produktiver, aber ebenso divergenter Forschung ist es an der Zeit zu prüfen, welche der vielen Ideen aus der Grundlagenforschung den Sprung in die Anwendung schaffen können. Das Fraunhofer IAF beteiligt sich an konvergenter, angewandter Graphen-Forschung mit einem Fokus auf der Kombination dieses neuen Materials mit bestehenden III/V-Verbindungshalbleiter-Systemen.

Nachdem eine einzelne Atomlage von Graphit vom theoretischen Konstrukt ohne jegliche praktische Bedeutung über Nacht zum »Wundermaterial« Graphen wurde, ist eine Vielzahl von potentiellen Anwendungen denkbar. So überraschend es ist, Graphen als atomar dünnes Material überhaupt herstellen und verarbeiten zu können, so schwer ist es, dies in einem industriellen Maßstab zu tun. Viele der möglichen Anwendungen von Graphen scheitern noch, da aufgrund der aufwendigen Technologien bisher kein konkurrenzfähiges Preis-Leistungs-Verhältnis erzielt wurde. Die Entwicklung von Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien ist daher ein Schlüssel zu Innovationen mit Graphen und damit ein naheliegender erster Schritt in der anwendungsorientierten Graphenforschung am Fraunhofer IAF.

Es werden zwei fundamental unterschiedliche Ansätze zur Herstellung von Graphen verfolgt: Der erste ist die chemische Gasphasenabscheidung auf großen Substraten. Dies beinhaltet die Erforschung einer Industrie-kompatiblen Technologie zur Abscheidung und zum Transfer von Graphen. Ziel ist dabei die skalierbare Kombination von Graphen mit existierenden III/V-Halbleiter-Bauelementen. Ein Beispiel ist die Nutzung von Graphen als nahezu masselose Elektrode für piezoelektrische Resonatoren wie sie in Mobilfunkfiltern eingesetzt werden. Die Theorie sagt für diese Resonatoren beste Schwingungseigenschaften voraus, wenn die verwendete Elektrode unendlich dünn wird. Diesem »unendlich dünn« kommt eine atomar dünne Graphenelektrode näher als alle alternativen Materialien. Hier spielt eine einzigartige Eigenschaft von Graphen eine entscheidende Rolle: Es bleibt selbst als atomar dünne Elektrode immer noch bemerkenswert elektrisch leitfähig. Mit solch dünnen Elektroden können die Gütefaktoren der Resonatoren nahe an ihr theoretisches Ideal kommen. Die Verbesserung der Güte piezoelektrischer Resonatoren führt zu höheren Kopplungsfaktoren und zu einer verbesserten Energieeffizienz von Hochfrequenzfiltern. Die immer höheren Anforderungen moderner Mobilfunkstandards fordern derartige innovative Bauelemente, um in diesem stark wachsenden Markt bestehen zu können. Das Fraunhofer IAF erforscht den Ansatz der nahezu masselosen Elektroden als einer der Partner im »Graphene Flagship«, der größten Förderinitiative in der Geschichte der Europäischen Union.

Ein zweiter Ansatz zur Gewinnung von Graphen am Fraunhofer IAF zielt auf Anwendungen für Mikrometer-große Graphenflocken. Eine vielversprechende Anwendung solcher Flocken ist als Elektrodenmaterial in sogenannten Superkondensatoren, das sind Bauteile zur Speicherung



2

conductive. Quality factors of the resonators can therefore approach their theoretical ideal. Improved quality factors of piezoelectric micro-electro-mechanical systems lead to, as an example, higher frequency selectivity and energy efficiency of radio frequency (RF) filters. The high demands of modern mobile communication standards on RF front ends ask for such innovations for new devices to enter this rapidly growing market. Fraunhofer IAF is investigating the potential of the approach of virtually massless electrodes as one of the core partners in the »Graphene Flagship«, one of the largest-ever European research initiatives.

A second graphene production route which is pursued at Fraunhofer IAF targets applications that require micrometer-sized graphene flakes. One promising application for such flakes is the use as an electrode material in so-called supercapacitors, energy storage devices with high energy density which support much faster charge/discharge cycles than conventional batteries. Their »super« capacitance originates from an inherently high capacitance of the electrochemical double layer (where no dielectric is required to separate charges) and the use of carbon electrode materials with an extremely high specific surface area. The »atomically thin but conductive« logic for graphene also applies to this case: being only one atom layer thick, electrodes made from graphene flakes represent the highest possible surface to volume ratio of carbon electrode materials. In contrast to conventional carbon electrodes, higher conductivity of the electrode material leads to lower internal resistance (and hence increased power density) and a larger effectively used surface.

Finding a suitable production route for graphene electrodes remains a limiting factor. The dominating technology to date is exfoliation from graphite via chemisorption of oxygen, which results in so-called graphene oxide. Although very effective, the inevitable introduction of structural defects upon oxygenation limits the conductivity of the flakes and therefore ultimately the performance margin of graphene based devices like supercapacitors. Even though alternative production routes for graphene flakes exist, the supercapacitor target market puts strict constraints on the production costs. Fraunhofer IAF has developed an electrochemical expansion method for natural graphite flakes (Fig. 4), which avoids oxygenation and the formation of defects. Chemisorption of hydrogen serves as a driving force for the separation of the individual atomic layers of graphite, but in contrast to oxygenation it proved to be a reversible process. Therefore, highly expanded graphite with a low density of defects can be achieved (Fig. 2). The cost-effective generation qualifies this technology for the use of this material in a wide range of other applications that require defect-free and highly conductive graphene flakes. Other energy conversion systems like (bio-) fuel cells can also benefit from a material with such properties. In combination with silver nanowires, these graphene flakes may find application as a transparent conductive layer in organic solar cells.

Starting with the effort to achieve production routes for the best graphenic materials, Fraunhofer IAF intends to bridge the gap between basic graphene research and innovation and is dedicated to its role as a hub and a partner to turn ideas from basic research into innovations realized by industry.



3

2 Graphite exfoliation to graphene by electrochemical hydrogenation (green) leads to a significant reduction of defects compared to conventional exfoliation via graphene oxide (orange).

Elektrochemische Expansion von Graphit zu Graphen mittels Hydrogenierung (grün) führt zu einer signifikanten Reduktion von Defekten im Vergleich zur konventionellen Expansion über Graphenoxid (orange).

3 View into the graphene reactor chamber, where graphene is growing on an up to 1000 °C hot catalyst surface.

Blick in die Prozesskammer des Graphen-Reaktors, in der Graphen auf einer bis zu 1000 °C heißen Katalysatoroberfläche abgeschieden wird.

4 Natural graphite powder (Hoffmann & Co Elektrokohle AG), an abundant resource for the production of graphene flakes.

Naturgraphit (Hoffmann & Co Elektrokohle AG), eine reichhaltige Ressource für die Herstellung von Graphenflocken.



4

von Energie mit möglichst hoher Energiedichte, aber deutlich schnelleren Lade-/Entladezyklen als bei herkömmlichen Batterien. Die »Super«-Kapazität dieser Kondensatoren ist auf die inhärent hohe Kapazität der elektrochemischen Doppelschicht und auf die Verwendung von Kohlenstoffelektroden mit extrem großer Oberfläche zurückzuführen. Die »atomar-dünn-aber-leitfähig«-Logik für Graphen kommt auch in diesem Fall zum Tragen: Mit einer Dicke von nur einer Atomlage erreicht dieses Material das maximal mögliche Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Im Gegensatz zu konventionell verwendeter Aktivkohle versprechen Graphenelektroden eine höhere Leitfähigkeit und damit, neben einer höheren effektiv genutzten Elektrodenoberfläche, auch eine erhöhte Leistungsdichte der Kondensatoren. Noch ist die Suche nach einer geeigneten Produktionsmethode für Graphenflocken der limitierende Faktor. Das bisher am weitesten verbreitete Herstellungsverfahren ist das Aufblättern von Graphit durch Chemisorption von Sauerstoff, was in sogenanntes Graphenoxid resultiert. Auch wenn dieses Verfahren sehr effektiv ist, leidet die Leitfähigkeit der resultierenden Flocken durch die unvermeidliche und irreversible Einbringung von Defekten ins Kohlenstoffgitter, was letztlich den möglichen Leistungsvorteil mit graphenischen Elektroden in Superkondensatoren limitiert. Alternative Herstellungskonzepte existieren zwar, bisher hat sich aber keines wegen der sehr strikten Anforderungen an die Herstellungskosten durchsetzen können. Am Fraunhofer IAF wurde ein elektrochemisches Verfahren zur Gewinnung von Graphen aus Naturgraphitflocken (Abb. 4) entwickelt, welches Oxygenierung und die damit einhergehenden Defekte im Graphen vermeidet. Die Chemisorption von Sauerstoff wurde mit Chemisorption von Wasserstoff ersetzt, ein reversibler Prozess, der keine Defekte hinterlässt. So kann eine Expansion von Graphit zu Graphen mit sehr geringer Defektdichte erreicht werden (Abb. 2). Die kosteneffiziente Herstellung von defektfreien Graphenflocken qualifiziert diese Technologie für Anwendungen in denen elektrisch und thermisch hochleitfähige Graphenflocken erforderlich sind. Neben Superkondensatoren könnten auch Energiewandlungssysteme wie (Bio-)Brennstoffzellen von einem Material mit derartigen Eigenschaften profitieren. In einer Kombination mit Silbernanodrähten könnten die Graphenflocken auch Anwendung als transparente Kontaktsschicht in organischen Solarzellen finden.

Beginnend mit den Bestrebungen industriell nutzbare Herstellungsverfahren für graphenische Materialien zu finden, platziert sich das Fraunhofer IAF als Vermittler und Partner zwischen Grundlagenforschung an Graphen und Innovationen in der Industrie.

HIGHLIGHTS 2014

- 
- 106** SHEDDING LIGHT ON PROCESSES – INITIALIZING IMPROVEMENTS
PROZESSE BELEUCHTEN – VERBESSERUNGEN INITIIEREN
- 108** CAREER: GRANTS FOR TOP FEMALE RESEARCHERS
KARRIERE: FÖRDERUNG FÜR TOP-WISSENSCHAFTLERINNEN
- 110** REACH – KEEPING AN EYE ON HAZARDOUS SUBSTANCES
REACH – GEFAHRSTOFFE IMMER IM BLICK
- 112** MODERN EQUIPMENT FOR EXCELLENT SCIENCE
MODERNE AUSSTATTUNG FÜR EXZELLENTE WISSENSCHAFT
- 116** FAIRS AND EVENTS 2014
MESSEN UND VERANSTALTUNGEN 2014

APPENDIX

ANHANG

120 PATENTS
PATENTE

121 EDUCATION AND TEACHING
AUSBILDUNG UND LEHRE

124 COMMITTEES, CONFERENCES, FAIRS
GREMIEN, TAGUNGEN, MESSEN

127 AWARDS AND GUESTS
AUSZEICHNUNGEN UND GÄSTE

128 PUBLISHING NOTES
IMPRESSUM

Our publications in reviewed journals and conference proceedings as well as information on our press releases and media coverage can be found at:
www.iaf.fraunhofer.de

Unsere Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und Tagungsbänden sowie Informationen zu unseren Presseaktivitäten finden Sie unter:
www.iaf.fraunhofer.de

SHEDDING LIGHT ON PROCESSES – INITIALIZING IMPROVEMENTS

PROZESSE BELEUCHTEN – VERBESSERUNGEN INITIIEREN

We truly enjoy doing research for our clients. While doing so we naturally focus our attention on the quality of our research results. But meeting deadlines as well as ensuring reasonable costs also plays an important role.

The continuous improvement process helps us to become more efficient. The coordination between the two units Epitaxy and Technology is showing first signs of success. Within the last two years, improved coordination and standardized processes have resulted in a 60 % increase of wafer throughput in our clean room. This increase, however, has not resulted in a neglect of adherence to delivery dates. It was possible to reduce the processing time in the area of X-ray diffraction. Currently 93 % of the tasks are being completed within two days (2013: 75 %). Furthermore, a shop-floor management

set a new milestone. This board gives an overview of all research projects at Fraunhofer IAF as well as their progress and status.

This makes it possible to detect difficulties early on, intervene and find solutions which are then put into practice in the entire institute. Key figures serve as objective measurement criteria and success monitors, for instance in the implementation of improvement suggestions across business segments. These measures are being revised, documented by all relevant members of staff, and decided upon together with the head of the Institute.

In 2015 we are aiming to further improve processes along the entire value chain from the development of new materials to the demonstration of functional systems. This includes competences such as design, analytics, measurement technologies and further ranges from the assembling of circuits, modules and systems to the delivery of the finished product to our customers. At the same time, Fraunhofer IAF will start an implementation which is both sustainable and organizational.

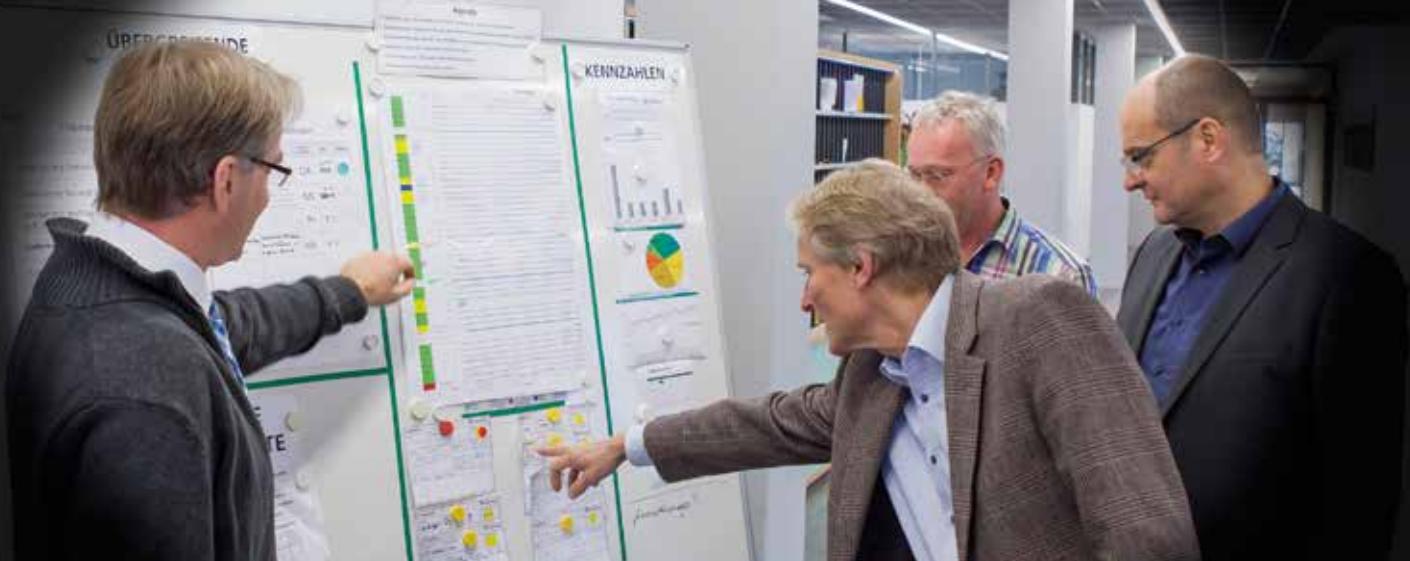
So far the continuous improvement process was planned and communicated by a specific team. In 2015 it is our goal to enable our employees and executives to continue to implement the continuous improvement process on their own and to integrate it as an inherent part into their everyday work.



»We are now placing even greater demands on our work. We have learned that we can reach our goals while continuously improving the quality of our work. We have become more efficient. This motivates us to keep improving even more.«

Mario Prescher, working in the Epitaxy department.

system is used to increase the transparency of order backlogs. Whereas previous efforts solely concentrated on individual units and their core competences, the year 2014 was marked by across-the-board activities for projects. The introduction of a project planning and controlling board



Wir forschen für unsere Kunden, und das tun wir gerne. Natürlich steht dabei die Qualität unserer Forschungsergebnisse im Mittelpunkt. Aber auch hohe Termintreue und angemessene Kosten spielen eine wichtige Rolle.

Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP) unterstützt uns dabei, effizienter zu werden.

Erste Erfolge zeigen sich bei der Koordination zwischen den Abteilungen Epitaxie und Technologie: Durch verbesserte Abstimmung und standardisierte Prozesse konnte der Wafer-Durchsatz im Reinraum in den letzten zwei Jahren um 60 % gesteigert werden, bei gleichbleibend hoher Liefertermin-treue. Bei der Röntgendiffraktometrie verringerte sich die mittlere Durchlaufzeit: 93 % der Aufträge werden mittlerweile innerhalb von 2 Tagen abgearbeitet (2013: 75 %). Ein Shopfloor-Management-System erhöht dabei die Transparenz über den aktuellen Auftragsbestand.

»Die Arbeit unserer Abteilung ist für mich transparenter geworden – was wir mit dem System erreicht haben, ist unglaublich. Es dauert, und vor allem wie viel wir eigentlich produzieren, ist mir jetzt klar.«

Michael Mikulla, Leiter der Abteilung Technologie

»Die Arbeit unserer Abteilung ist für den Rest des Hauses viel transparenter geworden – was wir machen, warum, wie lange es dauert, und vor allem wie viel wir eigentlich machen.«



Michael Mikulla, Leiter der Abteilung Technologie, in die der KVP bereits implementiert wurde.

Nachdem bisher der Fokus des KVP auf die einzelnen Abteilungen und Kernprozesse gerichtet wurde, war das Jahr 2014 geprägt von übergeordneter Koordination der Arbeitsprozesse auf Projektebene. Ein wichtiger Meilenstein war hier die Einführung der Projektplanungs- und -steuerungstafel. Sie gibt eine Übersicht über alle Projekte am Fraunhofer IAF sowie deren Fortschritt und Status. So ist es möglich Engpässe früh zu erkennen, steuernd einzugreifen, Lösungsansätze zu entwickeln und institutseitig umzusetzen. Kennzahlen dienen als objektives Bewertungsinstrument und zur Erfolgskontrolle der Umsetzung von geschäftsfeldübergreifenden Verbesserungsvorschlägen. Die mit der Institutsleitung beschlossenen Maßnahmen werden von allen betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern gemeinsam bearbeitet und dokumentiert.

2015 setzen wir den Verbesserungsprozess entlang der Wertschöpfungskette von der Materialentwicklung bis zur Demonstration von funktionstüchtigen Systemen fort. Dies beinhaltet in einem ersten Schritt Design, Analytik und Messtechnik und weiterführend den Aufbau von Schaltungen, Modulen und Systemen bis hin zur Auslieferung an den Kunden. Gleichzeitig beginnt die nachhaltige, organisatorische Verankerung des KVP am Fraunhofer IAF. Bisher wurde der Rahmen des KVP von einem zentralen Team geplant und kommuniziert. Das Ziel für das Jahr 2015 ist, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie Führungskräfte methodisch dazu zu befähigen, den KVP selbstständig weiterzuführen und als festen Bestandteil in ihren Arbeitsalltag zu integrieren.

CAREER: GRANTS FOR TOP FEMALE RESEARCHERS

KARRIERE: FÖRDERUNG FÜR TOP-WISSENSCHAFTLERINNEN

Fraunhofer TALENTA is a program for women in research, focused on the STEM subjects such as mechanical engineering, electrical engineering, computer science and physics. It offers female talents support at every step in their Fraunhofer career throughout two years, as well as a comprehensive accompanying program with a broad scope for the personal career development and the opportunity to network with other women at Fraunhofer. Fraunhofer Institutes participating in the TALENTA program are granted internal funds in order to finance additional time and individual training.

In 2013 and 2014 Fraunhofer IAF could recruit three female researchers for the TALENTA program. Birte Godejohann and Ana-Belén Amado-Rey started a doctoral position at Fraunhofer IAF with »TALENTA start«, while Daniela Bleh, who had already gained professional experience in industry, joined the »TALENTA speed up« program to focus more on scientific work. For Daniela Bleh, the special benefit of the program lies in the exchange and networking with other female scientist from different career levels – to see how others

pursue their career path and to exchange opinions and ideas in a personal and informal setting. »Also here at IAF, TALENTA offers a framework for close networking across the different departments. We gain insights into work areas we otherwise wouldn't get to know.« Daniela Bleh develops algorithms for the Fraunhofer IAF's millimeter-wave camera in the business unit High Frequency Electronics.

Ana-Belén Amado-Rey was recommended to the program by her professor at Cacares University, a former guest researcher at Fraunhofer IAF. For Ana-Belén Amado-Rey, the program offers a chance to elaborate her PhD thesis on high frequency electronics in close co-operation with her personal mentor and to benefit from individual training opportunities.

Also Birte Godejohann already gained valuable experiences from the training programs. For her, TALENTA offers the chance to deepen professional knowledge, as well as personal skills through additional training opportunities.



»The program offers the chance to obtain further training in different areas relevant for my personal career path. In the seminars, I furthermore benefit from the exchange with other women working in different scientific and technical fields. This allows to view my own research task from different perspectives.«

Birte Godejohann is working on the growth of nitride high electron mobility transistors.



Fraunhofer TALENTA ist ein Förderprogramm für Frauen in der Forschung, zumeist aus den MINT-Fächern, wie Maschinenbau, Elektroingenieurwesen, Informatik und Physik. Das zweijährige Programm bietet den talentierten Wissenschaftlerinnen Unterstützung auf dem Karriereweg bei Fraunhofer, ein umfassendes Begleitprogramm mit Spielraum für die persönliche Karriereentwicklung sowie die Möglichkeit, sich mit anderen Frauen innerhalb Fraunhofer zu vernetzen. Fraunhofer-Institute, die am TALENTA-Programm teilnehmen, erhalten interne Finanzierungsmittel, um die Kosten für zusätzliche Arbeitszeiten und Fortbildungen zu tragen.

In den Jahren 2013 und 2014 konnte das Fraunhofer IAF drei Wissenschaftlerinnen für das TALENTA-Programm gewinnen. Birte Godejohann und Ana-Belén Amado-Rey traten mit »TALENTA start« eine Promotionsstelle am Fraunhofer IAF an. Daniela Bleh, die bereits erste Berufserfahrungen in einem Industrieunternehmen sammeln konnte, wurde in »TALENTA speed up« aufgenommen, um sich verstärkt der wissenschaftlichen Arbeit zu widmen. Für Daniela Bleh liegt der besondere Gewinn des Programms im Netzwerken und Austausch mit anderen Wissenschaftlerinnen aus allen Karrierestufen und darin, zu sehen, wie andere ihren Karriereweg verfolgen, sowie Ideen und Meinungen in ungezwungenem Rahmen austauschen zu können.

»Auch hier am IAF bietet TALENTA einen Rahmen zum Netzwerken und zum Austausch zwischen den verschiedenen Abteilungen. So erhalten wir Einblicke in Arbeitsgebiete, die wir andernfalls nicht kennenlernen würden.«



Daniela Bleh erarbeitet Algorithmen für die am Institut entwickelte Millimeterwellenkamera.

Ana-Belén Amado-Rey wurde durch ihre Professorin an der Universität von Cacares, einer ehemaligen Gastwissenschaftlerin des Fraunhofer IAF, für das Programm empfohlen. Das TALENTA-Programm bietet für sie die Möglichkeit, in enger Kooperation mit ihrem persönlichen Betreuer intensiv an ihrer Doktorarbeit im Bereich Hochfrequenzelektronik zu arbeiten und von den zusätzlichen Fortbildungsmöglichkeiten zu profitieren.

Auch Birte Godejohann konnte dank TALENTA bereits wertvolle Weiterbildungserfahrungen sammeln: »Das Programm bietet mir die Möglichkeit mich in verschiedenen, für meinen persönlichen Berufsweg wichtigen Themenbereichen weiterzubilden. Bei den Seminaren kann ich zudem vom Austausch mit anderen Frauen aus verschiedenen naturwissenschaftlichen und technischen Bereichen profitieren. Damit eröffnen sich ganz neue Sichtweisen für die eigene Forschungsaufgabe.«

REACH – KEEPING AN EYE ON HAZARDOUS SUBSTANCES

REACH – GEFAHRSTOFFE IMMER IM BLICK

Smartphones, LEDs or lasers without III-V semiconductors? »No way«, is what most of you would respond. Nonetheless, the use of these semiconductors such as gallium arsenide (GaAs) and indium phosphide (InP) is currently being questioned. Although III-V semiconductors like GaAs and InP possess special physical properties that predestine them for applications in the field of (opto-)electronics, they can cause dangerous toxic effects under certain circumstances far from practice. This can happen if they are inhaled as dust. As a result of animal testing, GaAs- and InP-dust was classified as carcinogenic and toxic for reproduction. The production and processing of these semiconductor materials, as well as their processing into (opto)-electronic components, however, takes place under strictly controlled conditions in clean rooms. Only tiny amounts of encapsulated crystalline semiconductors can actually be found in the final components. Therefore, there is no need to fear health risks.

The European regulation REACH (EC No.1907/2006) regulates the production, application and placing on the market of chemicals within the EU. Substances which are classified as carcinogenic, mutagenic or toxic for reproduction can be identified as substances of very high concern (SVHC) and are included in the so-called candidate list. The identification of a substance as SVHC is merely based on its potential hazards, independent from actual risk situations. Following the prioritization process SVHC may be included in the authorization list.

These substances are only allowed to be produced, imported and placed on the market within the EU if they have been granted an authorization for their use from the European Chemicals Agency ECHA. The goal of the REACH regulation is to eventually replace SVHC by less dangerous substances or novel technologies – depending on the availability of suitable, economically and technically acceptable alternatives. However, such alternatives for III-V semiconductors do currently not exist and, despite many years of intense research, are not expected to emerge in the future.

Together with cooperation partners from industry and science, Fraunhofer IAF is thus elaborating a scientific database for an embracing risk assessment of III-V semiconductors. This measure aims at demonstrating to experts at ECHA as well as to political decision-makers that the risk in dealing with GaAs and other semiconductors is under control along the entire supply chain and at enhancing the essential role these materials play for current and future key technologies.

An authorization procedure for III-V semiconductors in the context of REACH would not result in higher safety, but weaken the competitiveness of European businesses instead: Without III-V semiconductors, many energy-efficient and resource-friendly technologies could not be realized and the achievement of global goals such as climate protection would become even more challenging.



Smartphones, LEDs oder Laser ohne III/V-Verbindungshalbleiter? »Geht nicht«, werden Sie sagen. Dennoch stehen Verbindungshalbleiter wie Galliumarsenid (GaAs) und Indiumphosphid (InP) momentan auf dem Prüfstand.

Denn auch wenn III/V-Verbindungshalbleiter wie GaAs und InP über besondere physikalische Eigenschaften verfügen, die sie für den Einsatz in der (Opto-)elektronik prädestinieren, können sie unter bestimmten, praxisfernen Bedingungen gefährliche toxische Effekte hervorrufen. Und zwar dann, wenn sie in Form von Staub eingeatmet werden. GaAs- und InP-Staub wurde nach entsprechenden Tierversuchen als karzinogen und reproductionstoxisch eingestuft. Die Herstellung dieser Halbleiter und ihre Verarbeitung zu (opto-)elektronischen Bauteilen erfolgt aber unter streng kontrollierten Bedingungen im Reinraum. In den fertigen Bauteilen finden sich nur Kleinstmengen kristalliner Halbleiter, welche zudem komplett eingekapselt sind, so dass kein Gesundheitsrisiko mehr besteht.

Die Europäische Chemikalienverordnung REACH (EG Nr. 1907/2006) regelt die Herstellung, Verwendung und das Inverkehrbringen von Stoffen innerhalb der EU. Stoffe, die als karzinogen, mutagen oder reproductionstoxisch eingestuft sind, können unter REACH als besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC) identifiziert und auf die sogenannte Kandidatenliste gesetzt werden. Eine solche Identifizierung erfolgt alleine auf Basis der potenziell gefährlichen Eigenschaften eines Stoffs, unabhängig von der tatsächlichen Risikosituation. SVHC können durch ein Priorisierungsverfahren in das Verzeichnis zulassungspflichtiger Stoffe aufgenommen werden. Diese dürfen nur hergestellt, importiert und in der EU in Verkehr gebracht werden, wenn für die entsprechende Verwendung des Stoffes eine Zulassung bei der Europäischen Chemikalienbehörde ECHA erhalten wurde. Das Ziel der REACH-Verordnung ist es, die besonders besorgniserregenden Stoffe durch weniger gefährliche Stoffe oder Technologien zu ersetzen – insofern geeignete, wirtschaftlich und technisch tragfähige Alternativen zur Verfügung stehen.

Solche Alternativen existieren für III/V-Verbindungshalbleiter jedoch trotz jahrelanger intensiver Forschung nicht und sind auch in Zukunft nicht zu erwarten. Das Fraunhofer IAF arbeitet mit Kooperationspartnern aus Wissenschaft und Industrie daran, eine wissenschaftliche Datenbasis für eine fundierte Risikobewertung von III/V-Verbindungshalbleitern zu erstellen. Auf diesem Weg soll den Experten bei der ECHA und den politischen Entscheidungsträgern nachvollziehbar dargelegt werden, dass das Risiko im Umgang mit GaAs und anderen III/V-Verbindungshalbleitern entlang der gesamten Wertschöpfungskette beherrscht wird und die Materialien essenziell für heutige und zukünftige Schlüsseltechnologien sind. Ein Zulassungsverfahren für III/V-Halbleiter im Rahmen von REACH würde daher keinen Zugewinn an Sicherheit bringen, die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen aber erschweren. Denn ohne III/V-Halbleiter wären viele energie- und ressourceneffiziente Technologien nicht realisierbar, und globale Ziele wie Klimaschutz wären ohne Innovationen aus diesem Bereich noch schwerer erreichbar.

MODERN EQUIPMENT FOR EXCELLENT SCIENCE

BLACK MAGIC



- *Optional plasma for sample preparation*
Plasmaoption zur Probenvorbehandlung
- *Homogeneous distribution of temperature and gas*
Homogene Temperatur- und Gasverteilung
- *Ratio pyrometer for accurate temperature control*
Quotientenpyrometer zur genauen Temperatursteuerung
- *Substrate temperature ramp of up to 300 °C / min*
Substratheizung mit bis zu 300 °C / min
- *Substrate diameter of up to 150 mm*
Substratdurchmesser von bis zu 150 mm

SPOT ON – FUNCTIONALITY AND TECHNICAL DATA

The new CVD reactor »Black Magic« facilitates the deposition of graphene. It is our aim to develop an inexpensive and simplified technology for the deposition and transfer of graphene in future, so that graphene can eventually be integrated in already existing III-V semiconductor components.

Der neue CVD-Reaktor »Black Magic« ermöglicht die Abscheidung des Materials Graphen. Zukünftig soll eine kostengünstige und vereinfachte Technologie zur Abscheidung und zum Transfer von Graphen entwickelt werden, um das neue Material auf lange Sicht in bestehende III/V-Halbleiter-Bauelemente zu integrieren.

MODERNE AUSSTATTUNG FÜR EXZELLENTE WISSENSCHAFT

CLEANIX

The microwave-plasma-driven CVD plant »CleanIX« serves for the growth of ultra-pure single-crystalline diamond. It facilitates the fabrication of very thin interfaces with dopant atoms within the diamond, where it is possible to obtain a sharp transition from the pure to the doped layers. Instead of applying ion implantation afterwards, the dopant atoms can be integrated directly in the diamond during the growth process.

Die Mikrowellen-Plasma-unterstützte CVD-Anlage »CleanIX« dient dem Wachstum von ultrareinem einkristallinem Diamant. Sie ermöglicht die Erzeugung sehr dünner Zwischenschichten mit Dotieratomen im Diamant, wobei ein scharfer Übergang von den reinen zu den dotierten Schichten möglich ist. Die Dotieratome können nun direkt beim Wachstum in den Diamanten eingebracht werden, statt wie bisher nachträglich mithilfe von Ionenimplantation.

- *Diamond growth: induced by methane hydrogen plasma*
Wachstum von Diamant: induziert durch ein Methan-Wasserstoff-Plasma
- *Maximum microwave plasma power: 6 kW*
Maximale Mikrowellenplasma-Leistung: 6 kW
- *Frequency of microwaves: 2.45 GHz*
Mikrowellen-Frequenz: 2,45 GHz
- *Parallel growth of a maximum of 7 samples or 3" diamond wafers*
Zeitgleiche Herstellung von maximal 7 Diamantproben oder 3"-Diamantwafern



SPOT ON – FUNCTIONALITY AND TECHNICAL DATA

RUDOLPH TECHNOLOGIES NSX 220

The new plant allows the fully automated inspection of structured semiconductor wafers. With the help of an optical microscope and a high-resolution camera system, deviations from normal conditions of the wafer structure can be detected. The exact positions of the deviations, as well as the precise correlation to substructures are automatically recorded.

Die neue Anlage ermöglicht die vollautomatisierte Inspektion von strukturierten Halbleiterwafern. Mit einem optischen Mikroskop und einem hochauflösenden Kamerasystem werden Abweichungen vom Sollzustand der Waferoberfläche erkannt. Die genaue Position der Abweichungen sowie die exakte Zuordnung zu einzelnen Teilstrukturen des Wafers werden automatisch protokolliert.



- *Defect inspection of structured wafers*
Defektinspektion strukturierter Wafer
- *Guaranteed detection of deviations > 2 µm*
Sichere Detektion von Abweichungen > 2 µm
- *Duration of the complete wafer inspection: 1 – 10 mins*
Dauer der vollflächigen Waferinspektion: 1 – 10 min
- *Fully automatic loading from wafer cartridges for 3" and 4" wafers*
Automatische Beladung aus Waferkassette für 3"- und 4"-Wafer
- *Manual loading for 6" and 8" wafers*
Manuelle Beladung für 6"- und 8"-Wafer

SPOT ON – FUNCTIONALITY AND TECHNICAL DATA

DMU 40 EVOLUTION 5-ACHS-BAZ

- *5-axis simultaneous machining*
5-Achsen-Simultanbearbeitung
- *Axis-acceleration: 9.81 m/s², changing of tools < 3 s*
Achsenbeschleunigung: 9,81 m/s², Werkzeugwechsel < 3 s
- *Components with edge length < 40 cm, weight < 0.25 t*
Werkstücke mit < 40 cm Kantenlänge und < 0,25 t Gewicht
- *Internal coolant at 60 bar*
IKZ mit 60 bar
- *Treatment of all metals and plastics*
Bearbeitung aller Metalle und Kunststoffe
- *In-house-programming of the control software*
Inhouse-Programmierung der Steuerungs-Software



SPOT ON – FUNCTIONALITY AND TECHNICAL DATA

The new 5-axis-milling-machine allows the simultaneous treatment of small and large, as well as heavy components from five sides. Therefore, the time necessary for changing tools can be minimized, thus accelerating the entire production process. Thanks to the internal coolant, disruptive metal chips can be directly removed and a high heat generation can be avoided.

Die neue 5-Achsen-Fräsmaschine erlaubt die simultane Bearbeitung kleiner und großer sowie schwerer Bauteile von fünf Seiten. Damit kann die zum Werkzeugwechsel benötigte Zeit minimiert werden, was den Produktionsprozess enorm beschleunigt. Dank innerer Kühlmittelzufuhr (IKZ) können störende Späne direkt im Bearbeitungsprozess beseitigt und eine hohe Hitzeentwicklung vermieden werden.

FAIRS AND EVENTS 2014



HANNOVER MESSE

Exhibition highlight: At this year's Hannover Messe from April 7th – 11th, many visitors came to get informed on new technologies and research projects of Fraunhofer IAF: With its extraordinary physical properties, diamond was presented as the trend-setting material for a great variety of applications. A LED retrofit lamp developed by Fraunhofer IAF, representing novel energy-efficient light sources based on gallium nitride formed a real »highlight«.

Messe-Highlight: Auf der diesjährigen Hannover Messe vom 7. – 11. April informierten sich zahlreiche Besucher über neue Technologien und Forschungsprojekte des Fraunhofer IAF: Diamant wurde mit seinen außergewöhnlichen physikalischen Eigenschaften als zukunftsweisendes Material für vielseitige Anwendungen präsentiert. Neue energieeffiziente Leuchtmittel auf Basis von Galliumnitrid stellten in Form einer am IAF entwickelten LED-Retrofit-Lampe ein echtes »Highlight« dar.



SENSOR + TEST

Dialog on innovation: Experts from industry and research were looking for the dialog with our scientists on this year's Sensor + Test from 3rd – 5th June in Nuremberg. The focus was set on a 94-GHz radar module which, used as a helicopter landing aid, is able to deliver precise data on height and velocity in spite of fog, dust or smoke. Also the long-term-stable UV detectors developed by Fraunhofer IAF formed the base for animated discussions with the visitors of the exhibition.



Innovationsdialog: Fachleute aus Industrie und Forschung suchten auf der diesjährigen Sensor + Test vom 3. – 5. Juni in Nürnberg das Gespräch mit unseren Wissenschaftlern. Im Fokus stand ein 94-GHz-Radarmodul, das als Hubschrauberlandehilfe trotz Nebel, Staub oder Rauch präzise Daten zu Höhe und Geschwindigkeit liefert. Auch die langzeitstabilen UV-Detektoren des Fraunhofer IAF sorgten für angeregte Gespräche mit den Besuchern der Messe.

MESSEN UND VERANSTALTUNGEN 2014

ITG-FACHAUSSCHUSS 7.2: FUNKSYSTEME

High-frequency views: On October 23rd, a great number of experts of the terahertz technology followed the Information Technology Society's invitation to a public discussion session at Fraunhofer IAF. Representatives from research and industry discussed, how new requirements for electronic systems can be met with high-performance terahertz radio systems. The program offered a forum for discussions, as well as presentations on the current state of research and the different application areas of terahertz technologies.

Durchblick mit Höchstfrequenz: Experten der Terahertz-Technologie folgten am 23. Oktober in großer Zahl der Einladung der Informations-technischen Gesellschaft des VDE zur öffentlichen Diskussionssitzung am Fraunhofer IAF. Vertreter aus Industrie und Forschung diskutierten, wie den Herausforderungen an elektronische Systeme mit leistungsfähigen Terahertz-Funksystemen begegnet werden kann. Das Programm bot sowohl Gelegenheit für Diskussionen als auch Präsentationen zum aktuellen Forschungsstand und den verschiedenen Anwendungsbereichen der Terahertz-Technologie.



FRAUNHOFER-JAHRESTAGUNG

With new energy: With this fitting motto, the »Green City« Freiburg hosted this year's conference of the Fraunhofer-Gesellschaft. On May 21st, around 700 invited guests gathered in the concert hall of Freiburg. At Fraunhofer IAF, we welcomed a delegation of the board of the Fraunhofer-Gesellschaft with an exhibition of our latest research findings: energy-efficient LED lamps, high-capacity laser systems for security technology and highly precise radar systems.



Mit neuer Energie: Unter diesem passenden Motto war die »Green City« Freiburg in diesem Jahr Gastgeber der Fraunhofer-Jahrestagung. Am 21. Mai kamen rund 700 geladene Gäste zum Festakt im Konzerthaus Freiburg zusammen. Am Fraunhofer IAF begrüßten wir eine Delegation des Fraunhofer-Vorstands mit einer Ausstellung unserer aktuellen Forschungsergebnisse: energieeffiziente LED-Leuchten, leistungsfähige Lasersysteme für Sicherheitstechnik sowie hochpräzise Radarsysteme im 94-GHz-Bereich.



FREIBURGER BUSINESSRUN

IAF in motion: 30 staff members of Fraunhofer IAF represented the Institute at the Freiburg BusinessRun on June 5th. Together with 3800 runners, Fraunhofer IAF participated with teams like »III-V-Halbläufer« (»III-V-Semirunners«) or »MicromecRUNics«. Motivated by the team spirit and the positive atmosphere among the audience and runners, they easily covered the distance of 6 km.

Das IAF in Bewegung: 30 Mitarbeiter des Fraunhofer IAF vertraten das Institut beim Freiburger BusinessRun am 5. Juni. Mit Teams wie »III-V-Halbläufer« oder »MicromecRUNics« ging das Fraunhofer IAF gemeinsam mit insgesamt 3800 anderen Läufern an den Start. Motiviert durch den Teamgeist und die positive Stimmung unter Läufern und Publikum absolvierten sie die Strecke von 6 km mit Leichtigkeit.

WISSENSCHAFTSCAMPUS FREIBURG

Platform for female researchers: Around 60 female students of STEM subjects gathered in Freiburg from the 6th – 9th of October to participate in the »Science Campus«, an event initiated by the Fraunhofer-Gesellschaft. Professional presentations and workshops at the five Fraunhofer Institutes, as well as seminars on personal competences and discussions with female scientists aimed at motivating the students to follow their career path in research. At Fraunhofer IAF, the young women developed new product ideas for semiconductor technologies together with our scientists.

Sprungbrett für Frauen in die Forschung: Rund 60 Studentinnen naturwissenschaftlicher Fächer kamen vom 6. bis 9. Oktober zum »Wissenschaftscampus« nach Freiburg, einer Veranstaltung der Fraunhofer-Gesellschaft.

Fachliche Einführungen und Workshops an den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten, Seminare zu persönlichen Kompetenzen, sowie Diskussionsrunden mit Wissenschaftlerinnen sollten die Studentinnen auf ihrem Karriereweg in der Forschung bestärken. Am Fraunhofer IAF entwickelten die jungen Frauen gemeinsam mit unseren Wissenschaftlern neue Produktideen für Halbleiter-Technologien.



DLR-BAUTEILEKONFERENZ

A look into space: From April 9th – 10th, the German Aeronautics and Space Research Center (DLR) held its annual components conference at Fraunhofer IAF. One hundred conference participants represented around sixty renowned industry and research institutions. Accompanied by 27 presentations, the participants discussed the requirements for and the availability of electric, electronic and electromechanical (EEE) components for space applications, as well as other recent developments in aerospace technology.

Blick ins All: Am 09. und 10. April war die Deutsche Luft- und Raumfahrtgesellschaft (DLR) mit der diesjährigen Bauteilekonferenz zu Gast am Fraunhofer IAF. Die hundert Konferenzteilnehmer vertraten rund sechzig renommierte Industrie- und Forschungseinrichtungen. Begleitet von 27 Vorträgen diskutierten die Teilnehmer die Anforderungen und Verfügbarkeit von elektrischen, elektronischen und elektromechanischen (EEE-) Bauteilen für Raumfahrtanwendungen sowie andere aktuelle Entwicklungen in der Raumfahrttechnik.

GIRLS' DAY

Early practice: During an exciting rallye through the research fields of Fraunhofer IAF on this year's »Girls' Day« on March 27th, young future talents learned about the great variety of discoveries and definitions possible with the help of physics and semiconductor technology. Female students, starting from grade 7, were invited to get to know the daily work and different activity fields at a research institute and to get informed on different education and career options. In conversations with female scientists from Fraunhofer IAF, the students had the chance to ask many questions about the work and education.

Früh übt sich: Bei einer spannenden Rallye durch die Forschungsfelder des IAF lernten junge Nachwuchstalente am »Girls' Day«, was man mit Physik und Halbleitertechnologien alles erkennen und entdecken kann. Schülerinnen ab der 7. Klasse waren eingeladen, die Arbeiten und Einsatzgebiete an Forschungsinstituten kennenzulernen und sich über mögliche Ausbildungs- und Berufswege zu informieren. Im Gespräch mit Wissenschaftlerinnen des Fraunhofer IAF konnten die Schülerinnen zahlreiche Fragen über die Arbeit und Ausbildung stellen.



PATENTS

PATENTE

Granted Patents

Patenterteilungen

C. Wild, E. Wörner, J. Biener, A. Hamza

*Verwendung von Hohlkugeln mit einer Umhüllung sowie
Vorrichtung zu ihrer Herstellung*

DE 10 2005 060 883 B4, 30.04.2014

C. Goßler, U. Schwarz, P. Ruther

*Verfahren zur Herstellung einer Mikro-LED-Matrix,
Mikro-LED-Matrix und Verwendung einer Mikro-LED-Matrix*

DE 10 2012 217 957.7, 25.06.2014

K. Köhler, S. Müller, P. Waltereit

Verfahren zur Bestimmung der Struktur eines Transistors

DE 10 2009 028 918, 22.07.2014

N. Schulz, M. Rattunde, J. Wagner, B. Rösener

Infrarot-Halbleiterlaser

US 8,811,442, 19.08.2014

T. Lim, R. Aidam, L. Kirste, R. Quay

Halbleiterlaserstruktur

JP 5608238, 05.09.2014

P. Dennler

Verstärker

DE 10 2013 209 686.0, 16.10.2014

Patent Applications

Patentanmeldungen

R. Reiner

Schaltungsanordnung

10 2014 203 851.0, 03.03.2014; Deutschland (DE)

T. Töpper, M. Rattunde, S. Kaspar, J. Wagner

Optisch gepumpter Halbleiter-Scheibenlaser

10 2014 205 022.7, 18.03.2014; Deutschland (DE)

P. Dennler

Verstärker

14/287,282, 27.05.2014; USA (US)

*C. Nebel, W. Müller-Sebert, C. Widmann, C. Schreyvogel, N. Heidrich
Substrathalter, Plasmareaktor und Verfahren zur Abscheidung*

von Diamant

10 2014 223 301.1, 14.11.2014; Deutschland (DE)

S. Maroldt

Integrated Inverter Circuit Using Unipolar Transistors

14/550,155, 21.11.2014; USA (US)

R. Quay, K. Köhler

Feldeffekttransistor und Verfahren zu seiner Herstellung

14/555,619, 27.11.2014; USA (US)

K. Köhler, S. Müller, S. Breuer

Method for Producing a Layer of a Compound Semiconductor

14/566,145, 10.12.2014; USA (US)

M. Seelmann-Eggebert

Kalibrationsverfahren für Millimeterwellen-Bauelemente

10 2014 119 331.8, 22.12.2014; Deutschland (DE)

EDUCATION AND TEACHING

AUSBILDUNG UND LEHRE

Academic Lectures and Seminars

Vorlesungen und Seminare

Oliver Ambacher

Nanobiotechnologie;
Universität Freiburg/Br., SS 2014
Verbindungshalbleiter Mikrosysteme;
Universität Freiburg/Br., WS 2013/2014, WS 2014/2015

Christoph Nebel

Solid State and Semiconductor Physics;
Universität Freiburg/Br., SS 2014

Rüdiger Quay

RF and Microwave Circuits and Systems;
Universität Freiburg/Br., WS 2013/2014, WS 2014/2015
RF and Microwave Devices and Circuits;
Universität Freiburg/Br., SS 2014
Design Course: RF- and Microwave Systems
Universität Freiburg/Br., SS 2014
Power Electronics: Devices and Concepts;
Universität Freiburg/Br., WS 2013/2014, WS 2014/15

Ulrich T. Schwarz

Optoelectronic Devices;
Universität Freiburg/Br., SS 2014
Epitaxy and Processing of Compound Semiconductors;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015
Optics Colloquium;
Universität Freiburg/Br., SS 2014, WS 2014/2015

Lutz Kirste

Theory and Applications of X-ray Diffractometry;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015

Joachim Wagner

Grundlagen der Halbleiterphysik;
Universität Freiburg/Br., WS 2013/2014, WS 2014/2015
Aktuelle Probleme der Festkörperphysik und der
Materialforschung;
Universität Freiburg/Br., WS 2013/2014, SS 2014, WS 2014/2015

Martin Walther

Quanteneffektbauelemente und Halbleitertechnologie;
Karlsruher Institut für Technologie KIT, SS 2014

Doctoral Theses

Promotionen

Daniel Bruch

A Compact In-Situ Cryogenic Noise Measurement System for Characterization of Low Noise Amplifiers; Universität Stuttgart

Markus Cäsar

Reliability Studies of GaN High Electron Mobility Transistors; Universität Freiburg/Br.

Bastian Tobias Galler

Ladungsträger-Rekombination und -Transport in InGaN-basierenden Leuchtdioden; Universität Freiburg/Br.

Daniel Lopez-Diaz

Broadband Transceiver Circuits for Millimeter-Wave Wireless Communication; Universität Stuttgart

Michael Masur

InAs/GaSb-Infrarotdetektoren mit reduziertem Dunkelstrom; Universität Freiburg/Br.

Diploma and Master Theses

Diplom- und Master-Arbeiten

Steffen Adler

Infrarot-Halbleiterscheibenlaser: Einfluss und Optimierung des resonatorinternen Wärmespreizers; Universität Freiburg/Br.

Robert Bergmann

Simulation und Analyse GaN-basierter LED-Treiber; Universität Freiburg/Br.

Verena Blattmann

Untersuchung von Fernfeldeigenschaften und Modenstruktur von Quantenkaskadenlasern im externen Resonator; Universität Freiburg/Br.

Poulomi Das

Spectrally Resolved Photoconductivity and Constant Photocurrent Measurements (CPM) on Ultra-pure Diamond; Universität Freiburg/Br.

Helge Höck

GaN-basierte Laserdioden im externen Resonator zur Erzeugung ultrakurzer Lichtpulse; Universität Freiburg/Br.

Karl Jacob

Untersuchung der Eigenrauschmechanismen metamorpher HEMT zwischen 5 GHz und 25 GHz bei 15 K; Universität Freiburg/Br.

Nataraj Kumar Kalipatnapu

Characterization and Optimization of Wafer-Bonded AlGaN/GaN HEMT on CVD Diamond Substrate; Universität Freiburg/Br.

Bachelor Theses

Bachelor-Arbeiten

Felicia Kiebler

*Integrated Drivers for GaN Base Station Power Amplifiers;
Universität Freiburg/Br.*

Timo Abels

*Reflexionsspektroskopie an verschiedenen Wasserproben im
Millimeterwellenbereich; Universität Freiburg/Br.*

Florian Lemke

*Parameterextraktion an InAs/GaSb-Übergitterdetektoren für das
langwellige Infrarot; Universität Freiburg/Brg.*

Lukas Pinti

*Piezoelektrisch aktivierte Membranen für die Mikrooptik;
Universität Freiburg/Br.*

Stefan Mönch

*Robust Gate Driver Circuit for Monolithic Integration with GaN-on-Si
600 V Power Transistor; Universität Stuttgart*

Claudia Lisa Schilling

*Entwicklung und Charakterisierung von gesputterten AlN-Schichten für
mikroakustische Sensoren; Universität Freiburg/Br.*

Markus Reisacher

*Verbesserung der Lichtextraktionseffizienz von UV-Dünnenschicht-LEDs
durch nasschemische Oberflächenstrukturierung;
Universität Freiburg/Br.*

Andreas Christian Steffen

*Charakterisierung und Integration von III-V-Nanodraht-
Heterostrukturen für neuartige optische Gassensorik;
Universität Freiburg/Brg.*

Uchenna Udeh

*High-Power-Efficiency AlGaN/GaN Packaged Power Amplifier Design
Using New Class-FJ and Class-FJ-1 Waveform Engineering Solutions;
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«, Strathclyde (UK), Member*
- *DFG-Fachkollegium 307 »Physik der kondensierten Materie«; Member*
- *Advisory Board Freiburger Materialforschungszentrum FMF, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Member*
- *Scientific Advisory Board Leibnitz-Institut für Analytische Wissenschaften ISAS, Dortmund; Vice Chairman*
- *Scientific Advisory Board KTD »Hardware Research & Technology«, Thales Group, Neuilly-sur-Seine (F); Member*
- *Program Committee of ISGN 6, »The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides«; Member*
- *Program Committee »Future Security – 9th Security Research Conference«; Member*
- *Program Committee »5th International Symposium on Growth of III-Nitrides ISGN 5«; Member*
- *Program Committee »International Workshop on Nitride Semiconductors IWN 2014«; Member*
- *Organizing Committee »E-MRS 2014 Spring Meeting: Functional Nanowires: Synthesis, Characterization and Applications«; Member*
- *International Steering Committee »6th International Symposium on Compound Semiconductors ISCS«; Member*
- *International Advisory Committee »11th International Conference on Nitride Semiconductors ICNS 2015«; Member*

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 »43rd Solid-State Device Research Conference ESSDERC«; Member*

Michael Dammann

- *Technical Program Committee »European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis ESREF 2014«; Member*

Arnulf Leuther

- *Program Committee »Indium Phosphide and Related Materials IPRM 2014«; Member*

Michael Mikulla

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

Christoph E. Nebel

- *Organization Committee »10th International Conference on Super-Hard Materials«; 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*
- *Associate Editor »Journal of Diamond and Related Materials«*

Rüdiger Quay

- IEEE Electron Devices Society Committee »Compound Semiconductor Devices and Circuits«; Member
- IEEE Microwave Theory and Techniques Society Technical Committee »MTT-6 Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits«; Co-Chair
- EURAMIG European Radio and Microwave Interest Group; Core Group Member
- Technical Program Committee »International Microwave Symposium IMS 2014«; Member, Chairman of »Power Amplifier Devices and Circuits«
- Associate Editor »IEEE Electron Device Letters«
- Associate Editor »International Journal of Microwave and Wireless Technologies«

Robert Rehm

- Program Committee, »SPIE Security + Defence 2014«, Conference on »Emerging Technologies«, Member

Frank Rutz

- Program Committee, »2nd International Workshop on Infrared Technologies«, Member

Michael Schlechtweg

- Program Committee »European Microwave Week EuMW 2014«; Member
- Program Committee »International Wireless Symposium«; Member
- Program Committee »GeMIC«; Member
- VDE-ITG, Fachausschuss »THz Funksysteme«; Member

Joachim Wagner

- Program Committee »Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices MIOMD-XII«; Member

Martin Walther

- Program Committee »Infrared Sensors and Systems IRS² 2014«; Member
- Program Committee »International Symposium on Optronics in Defense and Security 2014«; Member
- Program Committee »19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy«; Member

Ulrich T. Schwarz

- Program Committee »Photonics West - Gallium Nitride Materials and Devices X«; Co-chair
- Program Committee »Optogenetics and Optical Control of Cells SPIE«, Member
- Program Committee »International Workshop on Nitride Semiconductors IWN«, Member

Conference Organisation

Tagungsorganisation

Rüdiger Quay, Nils Pohl, Roger Kaul

International Microwave Symposium IMS 2014

Student Design Competition »Statistical Multiband

Multistandard Receiver Module«

Tampa (USA), 1 – 6 Jun 2014

Rüdiger Quay, Frank Sullivan, John Pierro

International Microwave Symposium IMS 2014

Workshop »Modern RF-Module Design: Integrated

Forms of Silicon and Gallium Nitride«

Tampa (USA), 1 – 6 Jun 2014

Martin Walther

42nd Freiburg Infrared Colloquium

Freiburg/Br. (D), 3 – 4 Mar 2015

Exhibitions and Fairs

Ausstellungen und Messen

*DWT-Konferenz mit Ausstellung: Angewandte Forschung
für Verteidigung und Sicherheit in Deutschland 2014*

3 – 5 Feb, Berlin (D)

IFAT 2014

5 – 9 May, Munich (D)

Hannover Messe 2014

7 – 11 Apr, Hannover (D)

SENSOR+TEST 2014

3 – 5 Jun, Nuremberg (D)

European Microwave Week 2014

5 – 10 Oct, Rome (I)

Job-Start-Börse 2014

23 – 24 Oct, Emmendingen (D)

AWARDS AND GUESTS

AUSZEICHNUNGEN UND GÄSTE

Awards

Auszeichnungen

Fang Gao

Young Scientist Award of the European Materials Research Society

»Diamond Foam as a Novel Material for High Performance

Supercapacitors«

Arnulf Leuther

EuMIC 2014 Best Paper GAAS Association AWARD

»20 nm Metamorphic HEMT Technology for Terahertz Monolithic Integrated Circuits«

Michael Mikulla

Award of the Bundeswehr Technical Center for Information Technology and Electronics (WTD 81) in Greding in recognition of the coordination of the project »MANGA – Manufacturable GaN-SiC substrates and GaN epi wafers supply chain« realized by the European Defence Agency

Ulrich T. Schwarz

»Senior Member« of the Optical Society of America

Fabian Thome

APMC Best Paper Student Award 2014

»A Low-Power W-Band Receiver MMIC for Amplitude Modulated Wireless Communication up to 24 Gbit/s«

Guest Scientists

Gastwissenschaftler

Jakob Hayden

QuantaRed Technologies GmbH, Vienna (A)

Beatriz Aja Abelan

Universidad de Cantabria (E)

Yolanda Campos Roca

Universidad de Extremadura, Cáceres (E)

Aaron Pereira

Macquarie University, Sydney (AUS)

Mikko Varonen

Aalto University (FI)

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

Director

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Ambacher

Public Relations

Sonja Kriependorf
Tel. +49 761 5159-450
Fax +49 761 5159-71450
sonja.kriependorf@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 2015

Editorial Board

Redaktion

Oliver Ambacher, Ines Bott, Swenja Broschart, Sandra Iselin,
Sonja Kriependorf, Julia Roeder

Layout, Typesetting, Printing

Layout, Satz, Druck

netsyn, Joachim Würger, Freiburg

Photos

Fotos

istock.com, Yarygin (cover);
Achim Käflein (pp. 3, 6-7, 22-25, 27-28, 40-41, 43, 56-57,
59, 72-73, 75, 88-89, 91, 104-105, 113, 114);
Andréé Kaiser (p. 4);
Icons designed by Flaticon.com, www.flaticon.com (p. 12, 13);
Sanja Hügel (p. 13);
Simon Kraus – Fotolia.com (p. 15 top);
Infineon (p. 15);
sdecorer – Fotolia.com (p. 17 top);
Diehl (p. 17);
ESA – P. Carril (p. 35);
Mechanik/ Dream-Emotion/ stokkete – Fotolia.com (p. 36);
Fraunhofer ISIT (p. 60);
Fraunhofer (p. 109);
A_Bruno – Fotolia.com (p. 111);
Kurt Fuchs/Fraunhofer (pp. 116 top, 116 bottom);
Dragos Popescu/Fraunhofer (p. 118 bottom);
Fraunhofer IAF (Sandra Iselin, Oliver Korn, Liana Marek)

FAIRS AND CONFERENCES 2015

MESSEN UND TAGUNGEN 2015

42nd FREIBURG INFRARED COLLOQUIUM
FREIBURG, 03. – 04.03.2015

LASER WORLD OF PHOTONICS
MÜNCHEN, 22. – 25.06.2015

COMPOUND SEMICONDUCTOR WEEK
SANTA BARBARA, CA, USA, 28.06. – 02.07.2015

FREIBURGER WISSENSCHAFTSMARKT
FREIBURG, 10. – 11.07.2015

11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON
NITRIDE SEMICONDUCTORS
BEIJING, CHINA, 30.08. – 04.09.2015

EUROPEAN MICROWAVE WEEK
PARIS, FRANCE, 06. – 11.09.2015

FUTURE SECURITY
BERLIN, 15. – 17.09.2015

SEMICON EUROPA
DRESDEN, 06. – 08.10.2015

3rd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
DEVELOPMENT OF CBRN-DEFENCE CAPABILITIES
BERLIN, 19. – 21.10.2015

MIKROSYSTEMTECHNIK-KONGRESS
KARLSRUHE, 26. – 28.10.2015

6th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GROWTH
OF III-NITRIDES
HAMAMATSU, JAPAN, 08. – 13.11.2015

**FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR
ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF**

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

**Director
Prof. Dr. rer. nat. Oliver Ambacher**

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

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