

2018/2019

QUANTENSPRUNG

ANNUAL REPORT/JAHRESBERICHT



Aufenthaltswahrscheinlichkeit
des angeregten, quantisierten
Elektrons ($3d_z^2$) in einem
Wasserstoffatom.

*Probability distribution of the
excited, quantized electron
($3d_z^2$) in a hydrogen atom.*

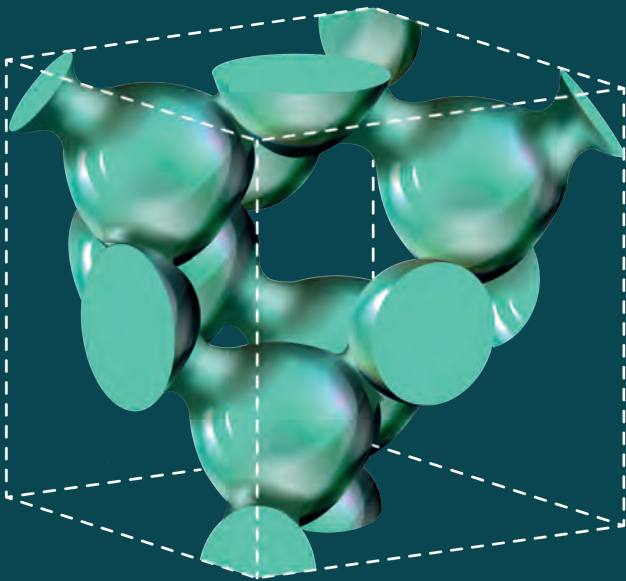
»Was wäre, wenn wir unsere Welt künftig auf eine völlig neuartige technologische Basis stellen können mit bislang unbekanntem Geräten und Verfahren, die nach den Regeln der Quantenmechanik arbeiten? Könnten wir dann Zusammenhänge erkennen, die uns bislang verborgen sind? Könnten wir Aufgaben lösen, an denen wir bislang scheitern?«

Quelle: BMBF, Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt, 2018.
<https://www.bmbf.de/pub/Quantentechnologien.pdf>

2018/2019

QUANTENSPRUNG

ANNUAL REPORT / JAHRESBERICHT



Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Valenzelektronen eines Halbleitermaterials mit kubischer Kristallstruktur.
Probability distribution of the valence electrons of a semiconductor material with cubic crystal structure.

02	INHALTSVERZEICHNIS <i>Content</i>
06	VORWORT <i>Preface</i>
08	HERAUSFORDERUNGEN GEMEINSAM MEISTERN <i>Mastering Challenges Together</i>
12	AUS EINER IDEE WIRD EIN PRODUKT <i>From Idea to Product</i>
14	MESSDIENSTLEISTUNGEN <i>Measurement Services</i>
16	INSTITUT IN ZAHLEN <i>Institute in Figures</i>
18	KURATORIUM <i>Advisory Board</i>

24	HIGH-ELECTRON-MOBILITY-TRANSISTOREN JENSEITS DES QUANTENLIMITS <i>High Electron Mobility Transistors Beyond the Quantum Limit</i>
32	QUANTENSPRUNG IN DER KOMMUNIKATION: AKTIVE ANTENNEN FÜR 5G <i>Quantum Leap in Communication: Active 5G Antennae</i>

22

QUANTENMECHANISCHES TUNNELN

Quantum Mechanical Tunneling

30

QUANTISIERTE ELEKTRONENZUSTÄNDE

Quantized Electron States

38

QUANTENKASKADENLASER

Quantum Cascade Lasers

46

QUANTUM-WELL-PHOTODETEKTOR

Quantum Well Photodetector

54

QUANTENSENSORIK

Quantum Sensing

40 **QUANTENKASKADENLASER FÜR
SPEKTROSKOPIE-ANWENDUNGEN**
*Quantum Cascade Lasers for
Spectroscopy*

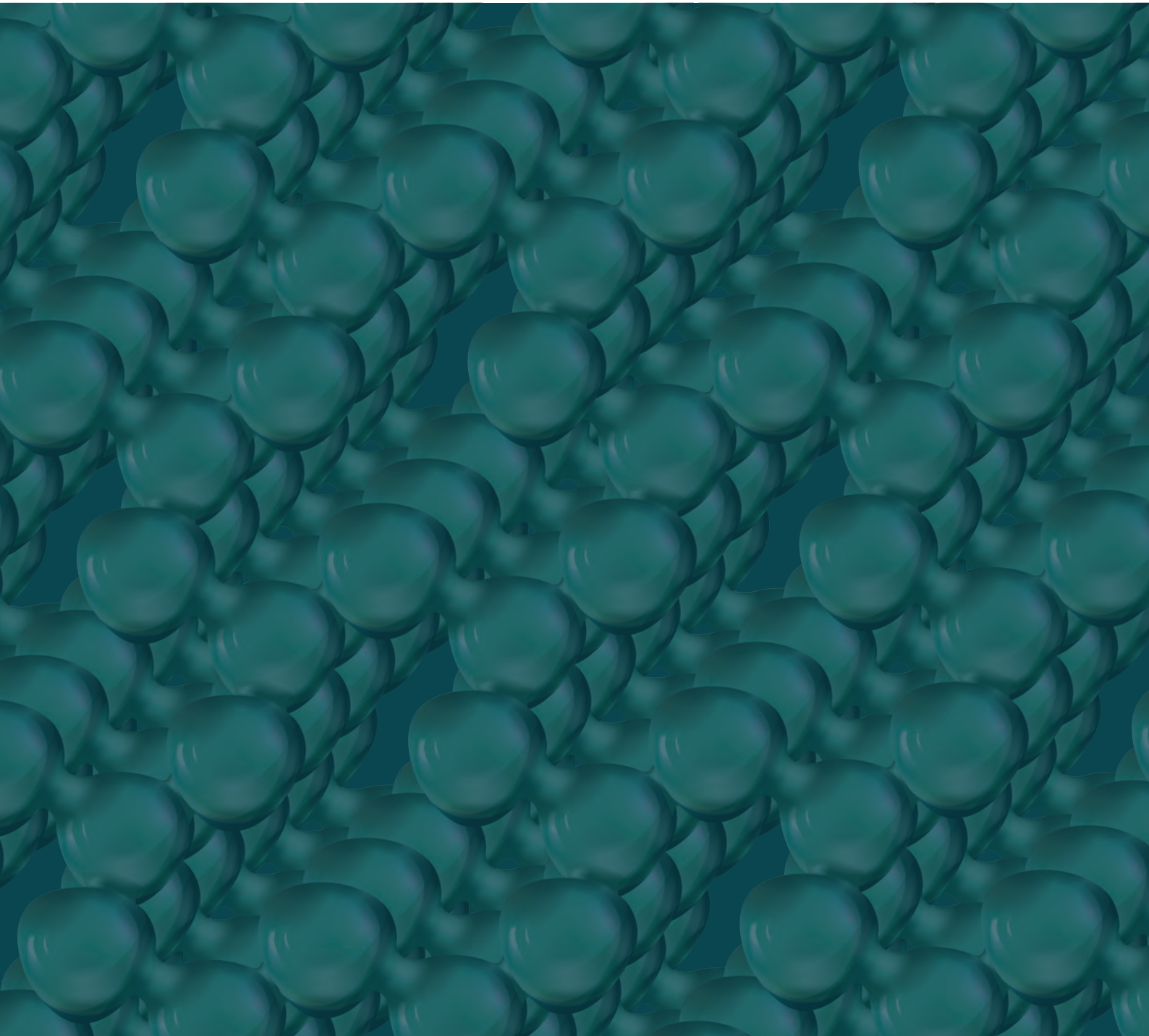
48 **NUTZUNG DES »QUANTUM CONFINEMENTS«
FÜR HOCHLEISTUNGSFÄHIGE INFRAROT-
DETEKTOREN**
*Leveraging Quantum Confinement for
High-Performance Infrared Detectors*

56 **LEITPROJEKT ZUR QUANTENMAGNETOMETRIE**
Lighthouse Project on Quantum Magnetometry

62 **ULTRASENSITIVE LASERSCHWELLEN-MAGNETOMETRIE:
QUANTENSENSORIK FÜR MEDIZINANWENDUNGEN**
*Ultrasensitive Laser Threshold Magnetometry:
Quantum Sensors for Medical Applications*

68 **QUANTENSENSOREN AUS DIAMANT FÜR
DIE MEDIZINTECHNIK**
Diamond Quantum Sensors for Medical Technology

74 **DIAMANT-EPITAXIE AUF WAFEREBENE
FÜR QUANTENBAUELEMENTE**
Wafer-Scale Diamond Epitaxy for Quantum Devices



82	WO SICH WISSENSCHAFTLER MAL IRRTEN ... <i>When Scientists Were Wrong</i>
83	WORIN SICH WISSENSCHAFTLER VIELLEICHT AUCH NOCH IRREN KÖNNTEN ... <i>What Scientists May Also Be Wrong About</i>
84	HÖHEPUNKTE 2018 <i>Highlights 2018</i>
88	PATENTE <i>Patents</i>
90	AUSBILDUNG UND LEHRE <i>Education and Teaching</i>
91	FAKTEN UND ZAHLEN <i>Facts and Figures</i>

92	ABSCHLUSSARBEITEN <i>Theses</i>
94	ORGANIGRAMM <i>Organigram</i>
96	FORSCHUNGSFABRIK MIKROELEKTRONIK DEUTSCHLAND <i>Research Fab Microelectronics Germany</i>
98	FÜR BEWERBER <i>Jobs@IAF</i>
102	IMPRESSUM <i>Imprint</i>
103	MESSEN UND VERANSTALTUNGEN <i>Fairs and Conferences</i>

BEDIENUNGSANLEITUNG

How to Use this Annual Report

FARBKODIERUNG
ZUM SCHNELLEN
AUFFINDEN DER
WISSENSCHAFT-
LICHEN BEITRÄGE

*Color coding to retrieve the
scientific contributions at a
glance*



+



=



SCAN
ME

QR CODE
APP

EXTENDED
CONTENT

MEHR INHALT

Additional Content

Zu einigen Artikeln in diesem Jahresbericht gibt es weiterführendes Material – z. B. Animationen, Videos oder Interviews – zu dem Sie durch Scannen der abgedruckten QR-Codes gelangen.
Some articles in this annual report offer additional content – such as animations, videos or interviews – which you can access by scanning the printed QR codes.



DIGITAL
EDITION

SEHEN

See

Ein E-Paper des vorliegenden Jahresberichts finden Sie unter:
An e-paper version of this annual report is available at:

<https://www.iaf.fraunhofer.de/jahresbericht.html>



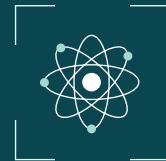
SCAN ME
+ LISTEN



HÖREN

Hear

Um das Leseerlebnis auditiv zu untermalen, bieten wir Ihnen eine Spotify-Playlist mit passender Soundästhetik.
In order to round off your reading experience with an auditory background, we offer you a Spotify playlist.



FLIP
ME



FÜHLEN

Feel

Überbrücken Sie kurz eingelegte Leseпаusen mit dem in der rechten oberen Ecke eingedruckten Daumenkino. Viel Spaß dabei!
The little flipbook printed in the upper right corner helps you bridge brief breaks in your reading. Enjoy!



Quantum technology can develop into a new, key technology in Germany. It can help to better meet the existing and future technical requirements of our society in information technology, electrical engineering, medical technology as well as safety and security. This social and economic added value of quantum technological research and development motivates a large number of funding initiatives in national and European research. This is an area to which Fraunhofer IAF would like to make important contributions in the fields of quantum sensor technology, quantum optics and quantum computing.

Quantum technology comprises quantum communication, quantum sensing, quantum computing and quantum simulation, all of which have been identified by the Fraunhofer-Gesellschaft as important research areas for the future of Germany as a high-tech country. In the international competition for the exploitation of developments in quantum technology, the Fraunhofer-Gesellschaft is positioning itself with a prioritized strategic initiative within the »Fraunhofer 2022« agenda, which aims to transfer quantum technological research and developments into German industrial innovations.

Thanks to Fraunhofer IAF's extensive expertise in the realization and processing of nanoscale semiconductor structures and the use of quantum physical effects in the development of novel electronic and optical devices, the institute is already making significant contributions to the development of quantum cascade lasers and quantum detectors. The institute is particularly proud of the fact that these quantum technological developments have been transferred into system demonstrators and production in close cooperation

with industrial partners. Particularly exciting is the ongoing development of quantum sensors in which the magnetic moments of individual electrons are used as magnets to enable the future imaging of current distribution in micro- and nanoelectronic circuits, or the detection of tiny clusters of fast-growing cancer cells. This Fraunhofer IAF development is supported by a large lighthouse project of the Fraunhofer-Gesellschaft and enables quantum leaps in the fields of electrical engineering and medical technology. Based on the successes achieved in controlling the position and spin orientation of individual electrons, Fraunhofer IAF is evaluating the processing of single and entangled qubits in high-purity diamond crystals. The vision of the institute is to realize quantum gates that operate at near room temperature and which could represent a quantum leap towards solid-state quantum computers.

In this annual report entitled »Quantum Leap«, we would like to introduce you to our ongoing and planned work in these exciting fields of research. We wish you an interesting and informative read.



Die Quantentechnologie kann sich in Deutschland zu einer neuen Schlüsseltechnologie entwickeln. Sie kann helfen, bestehende und zukünftige technische Anforderungen unserer Gesellschaft an die ingenieurwissenschaftlichen Bereiche der Informationstechnik, der Elektrotechnik, der Medizintechnik und der Sicherheitstechnik besser zu erfüllen. Dieser gesellschaftliche und wirtschaftliche Mehrwert der quantentechnologischen Forschung und Entwicklung motiviert eine hohe Anzahl an Förderinitiativen im nationalen und europäischen Forschungsraum, zu denen das Fraunhofer IAF in den Bereichen der Quantensensorik, der Quantenoptik und des Quantencomputings wichtige Beiträge liefern möchte.

Die Quantentechnologie umfasst die Quantenkommunikation, die Quantensensorik, das Quantencomputing und die Quantensimulation, die allesamt von der Fraunhofer-Gesellschaft als bedeutende Forschungsgebiete für die Zukunft des Hightech-Standorts Deutschland identifiziert wurden. Im internationalen Wettbewerb zur Verwertung quantentechnologischer Entwicklungen positioniert sich die Fraunhofer-Gesellschaft mit einer priorisierten strategischen Initiative innerhalb der Agenda »Fraunhofer 2022«, die den Transfer quantentechnologischer Forschung und Entwicklungen in Innovationen der deutschen Industrie zum Ziel hat.

Aufgrund der weitreichenden Expertise des Fraunhofer IAF in der Realisierung und Prozessierung von nanoskaligen Halbleiterstrukturen sowie der Nutzung quantenphysikalischer Effekte zur Entwicklung neuartiger elektronischer und optischer Bauelemente leistet das Institut bereits heute wesentliche Beiträge zur Entwicklung von Quantenkaskadenlasern und Quantendetektoren. Dabei ist das Institut besonders stolz darauf, dass diese quantentechnologischen Entwicklungen in enger Kooperation mit Industriepartnern in Systemdemonstratoren und die Produktion überführt werden konnten. Besonders

spannend ist die laufende Entwicklung von Quantensensoren, in denen die magnetischen Momente einzelner Elektronen als Tastmagneten genutzt werden, um zukünftig die bildgebende Darstellung der Stromverteilung in mikro- und nanoelektronischen Schaltungen oder den Nachweis kleinster Cluster von Krebszellen zu ermöglichen. Diese Entwicklungen des IAF werden durch ein großes Leitprojekt der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert und »Quantensprünge« in den Bereichen der Elektrotechnik und Medizintechnik ermöglichen. Basierend auf den erzielten Erfolgen in der Kontrolle der Position und Spin-Orientierung einzelner Elektronen evaluiert das Fraunhofer IAF die Prozessierung einzelner und verschränkter Qubits in hochreinen Diamantkristallen. Die Vision des Instituts besteht in der Realisierung von Quantengattern, die nahe Raumtemperatur betrieben und einen »Quantensprung« in Richtung festkörperbasierter Quantencomputer bedeuten könnten.

Im vorliegenden Jahresbericht »Quantensprung« möchten wir Ihnen unsere laufenden und geplanten Arbeiten zu diesen spannenden Forschungsgebieten näherbringen und wünschen Ihnen eine interessante und aufschlussreiche Lektüre.

Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher



HERAUSFORDERUNGEN GEMEINSAM MEISTERN

Mastering Challenges Together

2018 wurden die Bereichsleiterstrukturen des Fraunhofer IAF erweitert und zwei neue stellvertretende Institutsleiter berufen: Dr. Jutta Kühn als Bereichsleiterin für die Abteilungen und Dr. Rüdiger Quay als Bereichsleiter für die Geschäftsfelder. Im Gespräch erzählen sie von der Modernisierung des Instituts sowie von aufgeschlossenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, welche diese Veränderungen ermöglichen.

In 2018, the Fraunhofer IAF divisional director structures were expanded and two new deputy institute directors were appointed: Dr. Jutta Kühn, division director for the departments, and Dr. Rüdiger Quay, division director for the business units. They talk about the modernization of the institute and about open-minded employees who make these changes possible.

**WAS SIND IN DIESEM JAHR DIE WICHTIGSTEN VERÄNDERUNGEN AM IAF?**

Kühn — Die wohl größte strukturelle Veränderung ist die Zusammenlegung der beiden Abteilungen »Epitaxie« und »Neue Materialien«. Durch ihre Fusion werden die Kompetenzen beider Bereiche gebündelt, damit diese in Zukunft gemeinsam ausgebaut und gestärkt werden können. Gerade das wachsende Forschungsfeld der Diamantbauelemente profitiert von der Synergie, da die Materialforschung, die auf Epitaxie beruht, weiter vorangetrieben wird. Das schafft die Grundlage, um innovative und zukunftsfähige Bauelemente und Schaltungen auf Diamantbasis zu entwickeln.

Quay — Parallel zu den strukturellen Veränderungen gibt es auch viele inhaltliche Neuerungen. Wir erschließen neue Themen, haben größere und neue Arten von Projekten begonnen und schaffen parallel dazu die benötigten Strukturen. Zum Beispiel konnten wir ein Leitprojekt der Fraunhofer-Gesellschaft im Bereich der Quantenmagnetometrie gewinnen. Wir nehmen seit etwa drei Jahren mit steigender Frequenz an Großprojekten teil und koordinieren diese zum Teil auch selbst. Zusätzlich verändert sich auch unser Außenraum, der diese großen Projekte an vielen Stellen fordert. Es gelingt uns, große Projekte konkret an das IAF zu holen. Dieses Angebot haben wir bislang im laufenden Betrieb erweitert, es ist aber klug, dafür auch geeignete Strukturen zu schaffen. Daraus werden sich zukünftig viele neue Möglichkeiten für das Fraunhofer IAF ergeben.

WHAT ARE THE MOST IMPORTANT CHANGES AT IAF THIS YEAR?

Kühn — Probably the biggest structural change is the merger of the two departments »Epitaxy« and »New Materials«. Through their fusion, the competencies of both departments will be pooled so that they can be jointly expanded and strengthened in the future. The strongly growing research field of diamond devices in particular will benefit from the synergy, as materials research based on epitaxy will continue to be driven forward. This creates the basis for the development of innovative future circuits and devices based on diamond.

Quay — Parallel to the structural changes, there are also many innovations in terms of research topics. We are opening up new topics, have started larger and new types of projects and are, in parallel, creating the necessary structures. For example, we were able to win a lighthouse project of the Fraunhofer-Gesellschaft in the field of quantum magnetometry. We have been participating in major projects with increasing frequency for about three years now and are also coordinating some of them ourselves. In addition, our environment is also changing, often demanding increasingly large projects. We are succeeding in bringing large projects to IAF. So far, we have expanded our offer during ongoing operations, but it is wise to create suitable structures for this. This will open up many new opportunities for Fraunhofer IAF in the future.



Dr. Jutta Kühn (top) received her doctorate from Fraunhofer IAF in 2010 and became head of the Microelectronics department in 2016. She intends to use her knowledge and experience for the strategic development of the institute in the future. As a deputy director, Jutta Kühn would also like to focus more on personnel marketing to attract new talent.

WELCHE KONKRETEN ZIELE HABEN SIE FÜR DAS KOMMENDE JAHR?

Quay — Neben dem laufenden Geschäft in der stetig wachsenden Halbleiterindustrie möchten wir die für viele noch wenig greifbar scheinende Vision der Quantentechnologie real werden lassen und die von uns entwickelten Konzepte umsetzen. Wir haben dieses Jahr viele innovative Projekte zur Quantentechnologie gestartet. Diese in die Anwendung zu bringen ist sicherlich ein großes Ziel. Darüber hinaus wollen wir auch unsere Produktionsstrukturen und neue Kooperationsmodelle im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland weiterentwickeln, um in Zukunft noch leistungsfähiger zu werden.

Kühn — Um dem Wachstum gerecht zu werden und um die neuen Projekte zu bearbeiten, brauchen wir jetzt und auch in Zukunft deutlich mehr Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Um den anstehenden Bedarf des Personalwachstums zu decken, möchten wir daher neue Wege der Personalrekrutierung beschreiten.

WHAT CONCRETE GOALS DO YOU HAVE FOR THE COMING YEAR?

Quay — In addition to the ongoing business in the steadily growing semiconductor industry, we want to make the vision of quantum technology, which for many people still seems to be difficult to grasp, a reality, and to implement the concepts we have developed. This year we launched many innovative quantum technology projects, especially in the field of diamond research. Putting this into practice is certainly a major goal. In addition, we also want to further develop our production structures and new cooperation models within the framework of the Research Fab Microelectronics Germany in order to become even more attractive in the future.

Kühn — In order to meet the growth just mentioned, and to be able to process the new projects, we need significantly more employees now and in the future. In recent years, the number of employees has remained constant. In order to meet the upcoming needs of personnel growth, we also want to explore new ways of recruiting new talents.

WITH ALL THESE INTERNAL CHANGES, WHAT IS YOUR PERSONAL HIGHLIGHT 2018?

Kühn — I am pleased that the expanded divisional director structure has established itself so positively in the short time available. We now have three divisional directors, one for the departments, that's me, one for the business units, headed by Dr. Rüdiger Quay, and one for the research infrastructure with Dr. Mar-



WAS IST BEI ALL DEN INTERNEN NEUERUNGEN IHR PERSÖNLICHES HIGHLIGHT 2018?

Kühn — Es freut mich, dass sich die erweiterte Bereichsleiterstruktur in der Kürze der Zeit so positiv etabliert hat. Wir haben nun drei Bereichsleitungen: eine für die Abteilungen, die ich verantworte, eine für die Geschäftsfelder, die von Dr. Rüdiger Quay getragen wird, und eine für die Forschungsinfrastruktur mit Dr. Martin Walther als Bereichsleiter. Untereinander werden wir uns schnell einig und jeder weiß, welchen Part er oder sie übernimmt. Dabei ergänzen wir uns mit unseren Kompetenzen und dadurch, dass wir die Dinge aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Ich bin mir sicher, dass wir zusammen mit allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unseres Instituts in Zukunft noch mehr erreichen und das IAF voranbringen können.

Quay — Was mir positiv auffällt, ist, dass wir bei all den Veränderungen einem sehr aufgeschlossenen Institut gegenüberstehen. Wir erfahren stets die Unterstützung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die eine gute Nase dafür haben, was für das IAF richtig ist. Daher bin ich fest davon überzeugt, dass wir auch die kommenden Herausforderungen gemeinsam meistern werden.

Ein weiteres Highlight ist die Fortsetzung der Internationalisierung des IAF. Wir konnten uns in diesem Jahr dem US-Markt trotz regulatorischer Hürden nähern und arbeiten nun neben der ESA auch mit der NASA zusammen. Damit gelingt uns ein breiteres Auftreten der Fraunhofer-Gesellschaft in neuen internationalen Märkten.

tin Walther as division director. We are able to quickly come to an agreement and everyone knows which part he or she should play. We complement each other with our competencies and by looking at things from different perspectives. I am sure that together with the staff of our institute we will be able to achieve even more in the future.

Quay — I agree with that, and what strikes me as positive is that, with all the changes, we still have a very open-minded institute. We always receive the support of our employees, who have a good nose for what is right for IAF. I am convinced that together we will master the challenges ahead.

Another highlight is the continuation of the internationalization of IAF. This year, for example, we were able to approach the US market despite regulatory hurdles and are now working together with NASA as well as ESA. With this development, concrete steps have been taken to implement the Fraunhofer-Gesellschaft's broader presence in new international markets.



Dr. Rüdiger Quay (top) joined Fraunhofer IAF as a scientist in 2001. He became group leader for RF Measurement in 2004 and deputy head of the business unit and department in 2011. Since 2016, he has held the position of head of the business unit »Power Electronics«. As a deputy director of Fraunhofer IAF he is looking forward to helping shape the institute's future.

AUS EINER IDEE WIRD EIN PRODUKT

From Idea to Product

Bei uns finden Sie unter 200 Experten genau die, die Sie für Ihr Projekt brauchen. Mit einer hochmodernen technologischen Ausstattung, starken Kooperationen und unserer Erfahrung finden wir am Fraunhofer IAF Lösungswege für Ihre Fragen. Im ständigen Austausch mit unseren Industriekunden und Partnern entwickeln wir individuelle Verfahren, Demonstratoren und Prototypen oder führen Messungen für Sie durch.

With us you will find out of 200 scientists exactly the experts you need for your project. With our state-of-the-art technological equipment, strong cooperations and our experience we can find the solutions to your questions. In constant exchange with our customers and partners we develop individual technologies, demonstrators and prototypes or carry out measurements for you.

WARUM FRAUNHOFER IAF?

Zusammenarbeit: maßgeschneidert!

Wir bearbeiten sowohl mehrjährige Großprojekte als auch kleinere Vorhaben, die schnell umgesetzt werden können.

Gebündelte Kompetenzen

Wir bieten Ihnen über verschiedene Material- und Verfahrensgrenzen hinweg bestmögliche Lösungen.

Ihre Anfrage im Mittelpunkt

Bei Auftragsforschung gehen wir spezifisch auf Ihre Anfrage ein.

Kostengünstige Lösungen

Unsere Verfahren sind ressourcensparend für unsere Partner.

Geschütztes Umfeld

Vertraulichkeit und der Schutz Ihrer Daten haben bei unserer Arbeit oberste Priorität.

WHY FRAUNHOFER IAF?

Cooperation: tailor-made!

We handle large-scale projects with a duration of several years as well as smaller projects that can be implemented quickly.

Bundled competences

Due to our portfolio we can offer you the best possible solutions across different material and process boundaries.

Your request in the spotlight

Contract research allows us to respond specifically to your requests.

Cost-effective solutions

Our research infrastructure and processes save resources for our partners.

Protected environment

Confidentiality and the protection of your data has top priority in our work.



**MORE
INFO**





FRAUNHOFER IAF IN KOOPERATION MIT...

Cooperations with Partner Institutes and Universities

SUSTAINABILITY CENTER FREIBURG

The University of Freiburg in cooperation with the five Fraunhofer institutes situated in Freiburg researches and develops technologies and solutions for a sustainable future.



INATECH – DEPARTMENT OF SUSTAINABLE SYSTEMS ENGINEERING

INATECH engineers develop solutions for today's challenges in sustainable materials, energy systems and resilience. Fraunhofer IAF cooperates in research and teaching.



RESEARCH FAB MICRO- ELECTRONICS (FMD)

This cross-site R&D cooperation links the research and development infrastructure and the technological know-how of more than 2000 researchers in order to advance future-relevant research. For further information see p. 96.



FRAUNHOFER INSTITUTES

We also collaborate with other Fraunhofer institutes, including the Centre for Applied Photonics CAP in Glasgow, in order to develop all-in-one solutions for our customers. We are a member of the Fraunhofer Group for Defense and Security VVS as well as the Group for Microelectronics VμE.



MESSDIENSTLEISTUNGEN

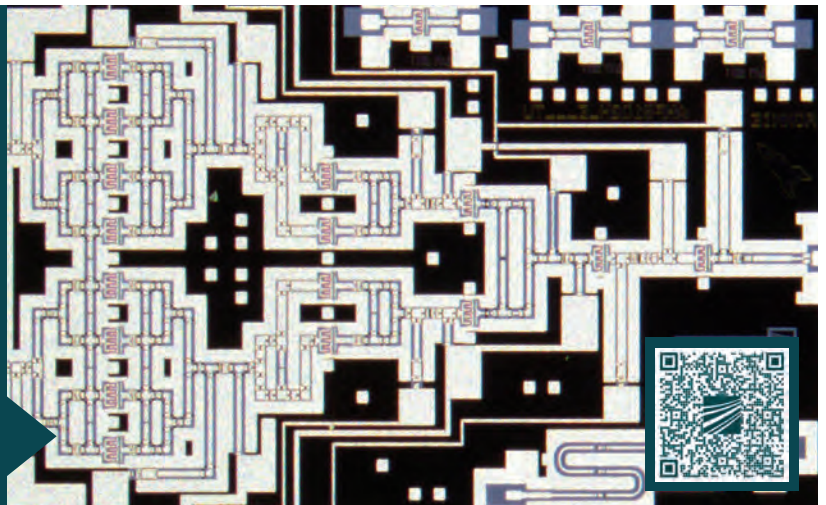
Measurement Services

Wir bieten unseren Kunden eine breite Palette an Messtechniken als Serviceleistung an.

At Fraunhofer IAF we offer our customers a wide range of measurement services.

MULTIPROJECT WAFER RUNS

Based on our epitaxial and technological capabilities, we offer electronic multi-project wafer runs and complete mask processing for customers. Both front side processing as well as back side processing are possible.



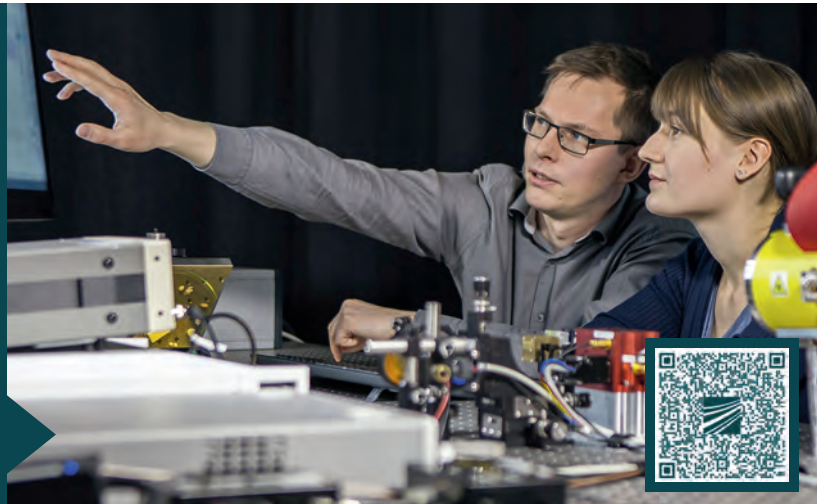
EPITAXY ON DEMAND

We offer you tailor-made solutions in the field of III-V semiconductor technology. Thanks to our state-of-the-art equipment, we are able to realize pilot series production of components for power and high frequency electronics as well as for semiconductor lasers.



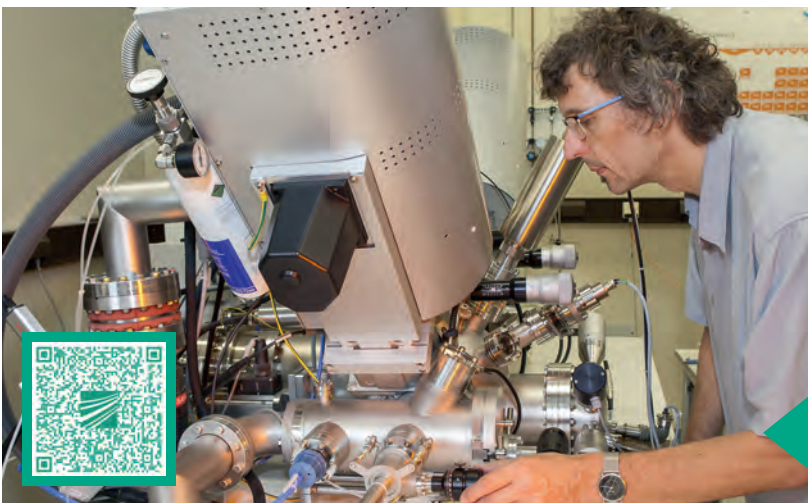
APPLICATION LABORATORY FOR LASER SPECTROSCOPY

Our innovative quantum cascade laser (QCL) technology identifies chemical substances much more reliably than comparable near-infrared spectroscopy and analyzes solid, liquid and gaseous substances in only one millisecond.



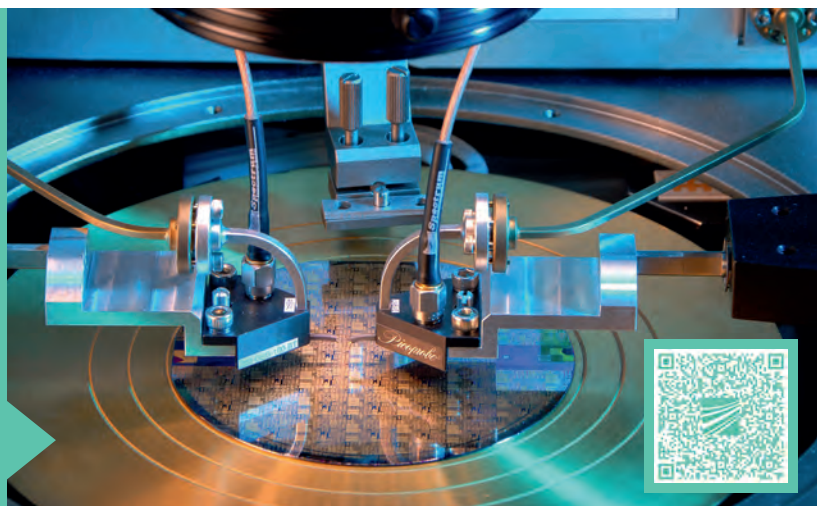
SEMICONDUCTOR MATERIAL ANALYSIS

As our partner or customer, you can make use of our expertise in a variety of analytical procedures, including optical analysis for the chemical and structural characterization of bulk semiconductors, semiconductor heterostructures and thin-film systems.



HIGH FREQUENCY MEASURING SYSTEMS

We offer a variety of measuring systems for the characterization of integrated circuits and high frequency modules, e. g. low power and low noise amplifiers, mixers, frequency multipliers, oscillators, switches and phase shifters.



INSTITUT IN ZAHLEN

Institute in Figures

Das Fraunhofer IAF rechnet im Jahr 2018 mit einem gegenüber dem Vorjahr deutlich erhöhten Betriebshaushalt, welcher bei ca. 29,5 Mio. € liegen wird. Hierfür sind insbesondere die aufgrund des gestiegenen Auftragsvolumens deutlich höheren Materialkäufe und die auslastungsbedingten höheren Betriebskosten verantwortlich. Somit werden die Sachaufwendungen mit 12,8 Mio. € einen Höchststand auch gegenüber dem veranschlagten Budget für 2019 erreichen. Die laufenden Investitionen sind für 2018 die Folgejahre auf einem hohen Niveau von jeweils über 6 Mio. € geplant. Zusätzlich werden auch im Jahr 2018 im Rahmen des BMBF-finanzierten Programms »Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland« weitere 5,9 Mio. € als Ausbauinvestitionen in zukunftsweisende technologische Geräte investiert.

Der größere Teil des Betriebshaushalts und der laufenden Investitionen werden voraussichtlich auch 2018 vom BMVg mit einem Anteil von ca. 52 % finanziert. Bei den Industrieerträgen wird ein absoluter Zuwachs von fast 1 Mio. € auf ca. 5 Mio. € erwartet, was einen Anteil von ca. 39 % an den zivilen Forschungsaktivitäten bedeutet. Der um knapp 5 Mio. € deutlich gegenüber 2017 höhere Gesamthaushalt in Höhe von 35,6 Mio. € erweist sich wiederum als sehr gut finanziert, so dass erneut mit einem positiven Jahresergebnis gerechnet wird.

Die Zahl der vollzeitäquivalenten Beschäftigten liegt 2018 bei 209 VZÄ. In absoluten Zahlen sind 272 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Fraunhofer IAF beschäftigt, davon sind 32 % weiblich. Von den 272 Beschäftigten sind 190 direkt in der Forschung und 82 in der Infrastruktur inklusive Leitungsbereich tätig. Von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der Forschung arbeiten 36 Personen an ihrer Doktor- oder Masterarbeit, sieben sind zum Zweck ihrer Berufsausbildung oder im Rahmen ihres Studiums an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg am Institut beschäftigt.

Fraunhofer IAF expects the operating budget for 2018 to be significantly higher than in the previous year – approximately € 29.5 million. This is especially due to significantly higher material purchases as a result of increased project volume. Moreover, there were higher operating costs due to higher capacity utilization of the research equipment. At € 12.8 million, operating expenses will thus reach a peak, even compared to the budget estimated for 2019. Investments for 2018 and the following years are each planned to reach a high level of more than € 6 million. In addition, in 2018, a further € 5.9 million will be invested in advanced technological equipment as part of the »Research Fab Microelectronics Germany«, which is funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF).

We expect the greater part of the operating budget and the current investments to be again financed by the Federal Ministry of Defence (BMVg), with a share of approximately 52 % in 2018. Industrial revenues are expected to grow by almost € 1 million to approximately € 5 million in absolute terms, which represents a share of about 39 % in civil research activities. The overall budget of € 35.6 million, which is almost € 5 million higher than in 2017, is again very well financed, so that we expect a positive annual result once more.

The number of full-time equivalent employees in 2018 is 209 FTE. The absolute number of employees amounts to 272. The proportion of female employees is 32 %. Of the 272 employees, 190 work directly in research and 82 in infrastructure, including management. Of the researchers, 36 are working on their doctoral or master's theses. Seven employees are at Fraunhofer IAF for their vocational training or as part of their studies at the Baden-Württemberg Cooperative State University.



**MITARBEITER /
-INNEN** *Employees*

272

GESAMTHAUSHALT (as of 09/2018)
Total Budget

35.6 MILLION €

DAVON

Thereof

74

Wissenschaftler/-innen
in Fachabteilungen
Scientists in R&D Departments

80

Nichtwissenschaftliche
Mitarbeiter/-innen in
Fachabteilungen

*Other Staff in R&D
Departments*

36

Masterstudierende /
Doktoranden/-innen
in Fachabteilungen

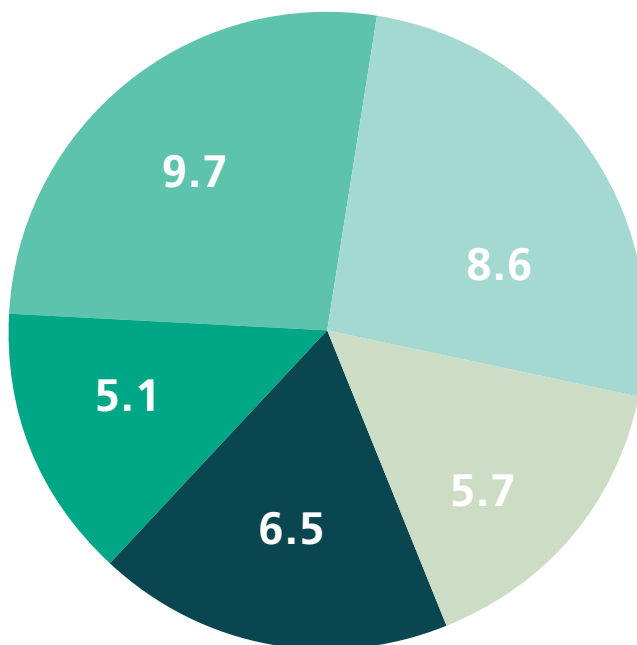
*Master & PhD Students in R&D
Departments*

82

Infrastruktur & Leitung
Infrastructure & Management

VON DEN 35,6 MILLIONEN €

Of these € 35.6 Million



- BMVg – Grundfinanzierung
MoD Basic Funding
- BMVg – Projektfinanzierung
MoD Projects
- Zivile Grundfinanzierung
Civilian Basic Funding
- BMBF, EU, Sonstige
MoER, EC, Other
- Industrie
Industry

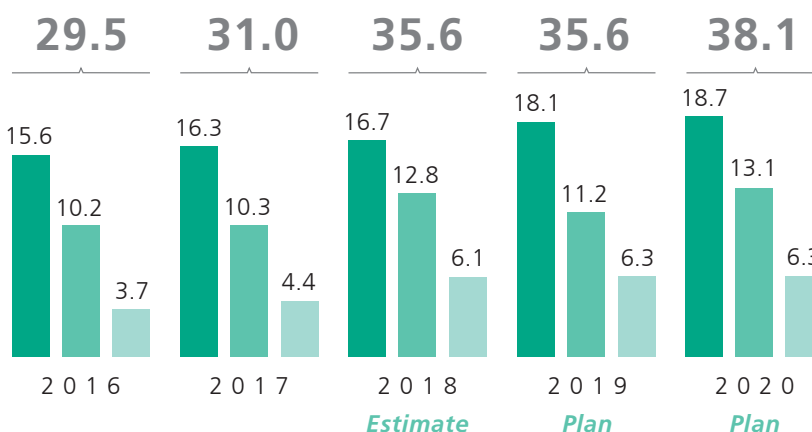
GESAMTHAUSHALT AUSGABEN IN MIO. €

Total Budget Expenses in Million €

■ Personalaufwendungen
Personnel Expenses

■ Sachaufwendungen
Non-Personnel Expenses

■ Investitionen
Investments



KURATORIUM

Advisory Board



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

Dr. Franz Auerbach

Infineon Technologies AG, Neubiberg

Dr. Klaus Beilenhoff

Guest / Gast

United Monolithic Semiconductors GmbH, Ulm

Dr. Hans Brugger

Chairman / Vorsitzender

HENSOLDT Sensors GmbH, Ulm

Prof. Dr. Jérôme Faist

ETH Zürich, Schweiz

MRin Dr. Ehrentraud Graw

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau

Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr. Johannes Koeth

nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH, Gerbrunn

Dr. Jens Kosch

X- FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt

Dr. Tomas Krämer

Institute Liaison / Institutsbetreuer, Fraunhofer-Gesellschaft, München

Dr. Rainer Kroth

Diehl BGT Defence GmbH & Co. KG, Überlingen

DirWTD Rainer Krug

Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik

und Nutzung der Bundeswehr, Koblenz

Prof. Dr. Jürg Leuthold

ETH Zürich, Schweiz



Teilnehmer/-innen der Kuratoriumssitzung 2018 am Fraunhofer IAF, teilweise in Vertretung der Vollmitglieder.
Participants of the Advisory Board meeting 2018 at Fraunhofer IAF, partly representing full members.

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

Dr. Ulf Meiners

*Guest / Gast
NICHIA Chemical Europe GmbH, Kronberg*

Dr. Thomas Metzger

Qualcom Germany RFFE GmbH, München

Dr. Thomas Roedle

Ampleon Netherlands B.V., Nijmegen, Niederlande

Dr. Alexander Roth

*Director Technology Marketing / Direktor Technologiemarketing,
Fraunhofer-Gesellschaft, München*

BDir Wolfgang Scheidler

*Guest / Gast
WTD 61, Manching*

Dr. Dietmar Schill

Sony Europe Limited, Stuttgart

Andreas Wälti

*Guest / Gast,
Evatec AG, Trübbach*

MinR Norbert Weber

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn

Prof. Dr. Werner Wiesbeck

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup

3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

QUANTENSPRUNG IST FÜR MICH ...

Quantum Leap Means for Me ...

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$$



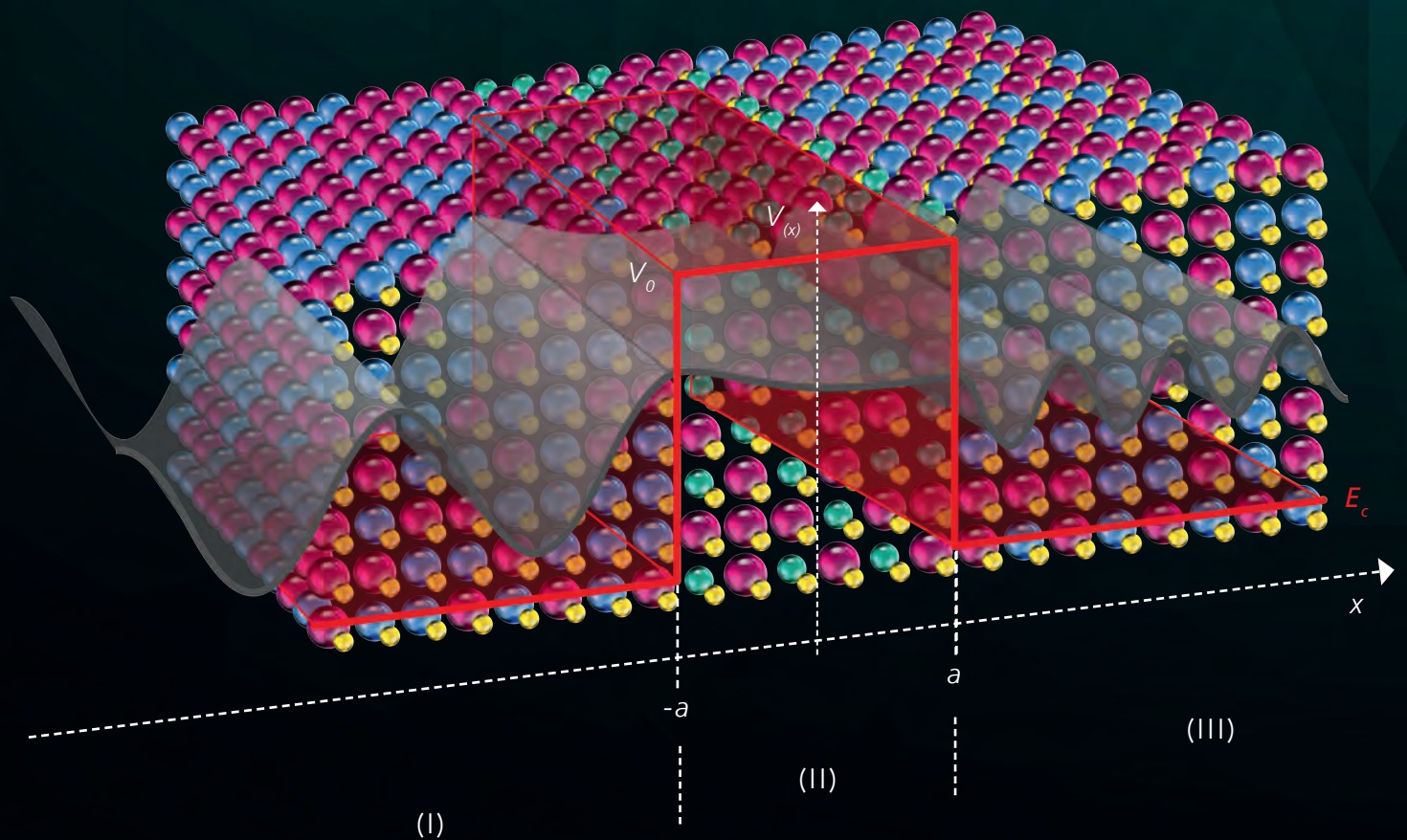
»... jedes wissenschaftliche Ergebnis, das die Welt ein kleines Stückchen besser macht.«

Dr. Dirk Schwantuschke, Gruppenleiter am Fraunhofer IAF, entwickelt Computermodelle, um das Verhalten von Bauelementen zu simulieren und die perfekte Schaltung zu entwerfen.

$$= \frac{-\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V \psi$$

QUANTENMECHANISCHES TUNNELN

Quantum Mechanical Tunneling





Ein Strom kann normalerweise bei einer anliegenden äußeren elektrischen Spannung durch einen elektrischen Leiter oder Halbleiter fließen. Durch einen Nichtleiter findet ein solcher Stromfluss normalerweise nicht statt. Ist der betreffende Nichtleiter, der eine Barriere für Elektronen darstellt, jedoch extrem dünn, so wird ein Tunnelstrom gemessen. Dieser kann mit Hilfe quantenmechanischer Wellenfunktion erklärt werden, deren Wahrscheinlichkeitsamplitude bei Auftreffen auf die Barriere nicht augenblicklich Null wird. Das Betragsquadrat der Wellenfunktion am Ende der Barriere nimmt exponentiell mit der Breite der Barriere ab, ist proportional zum Tunnelstrom und hinter der Barriere von Null verschieden. Dies bedeutet, dass Elektronen durch quantenmechanisches Tunneln dünne Barrieren bzw. nichtleitende Schichten überwinden können.

In der Abbildung wird die Barriere durch eine dünne Aluminiumindiumarsenid-Schicht (InAlAs) gebildet, die zwischen zwei Indiumgalliumarsenid-Schichten (InGaAs) eingebettet ist. Obwohl die potentielle Energie der Leitungsbandkante (E_c) an der InGaAs/InAlAs-Grenzfläche deutlich ansteigt, ist die Amplitude der Wellenfunktion (graue Linie) an der InAlAs/InGaAs-Grenzfläche nicht auf Null gefallen. Das Elektron besitzt hinter der nichtleitenden InAlAs-Barriere eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit, die dem Tunnelstrom durch die nichtleitende Schicht entspricht.

A current can normally flow through an electrical conductor or semiconductor when an external electrical voltage is applied. Such a current flow normally does not occur through a non-conductor. However, if the non-conductor in question, which acts as a barrier to electrons, is extremely thin, a tunnel current is measured. This can be explained with the help of quantum mechanical wave functions, whose probability amplitude does not immediately become zero when hitting the barrier. The magnitude square of the wave function at the end of the barrier decreases exponentially with the width of the barrier, is proportional to the tunnel current and is different from zero behind the barrier. This means that electrons can overcome thin barriers or non-conductive layers by quantum mechanical tunneling.

In the figure, the barrier is formed by a thin aluminum indium arsenide (InAlAs) layer embedded between two indium gallium arsenide (InGaAs) layers. Although the potential energy of the conduction band edge (E_c) at the InGaAs/InAlAs interface increases significantly, the amplitude of the wave function (gray line) at the InAlAs/InGaAs interface has not dropped to zero. The electron has a residence probability behind the non-conductive InAlAs barrier that corresponds to the tunnel current through the non-conductive layer.

HIGH-ELECTRON-MOBILITY-TRANSISTOREN JENSEITS DES QUANTENLIMITS

High Electron Mobility Transistors Beyond the Quantum Limit

In den letzten Jahren konnte die herausragende Hochfrequenzleistung von High-Electron-Mobility-Transistoren (HEMTs) durch eine rigorose Skalierung der Gatelänge auf nur 20 nm weiter verbessert werden. Aufgrund dieser Skalierung ist der HEMT nun in die Quantenwelt vorgestoßen, wo der Tunneleffekt der Elektronen die Eigenschaften des Bauelements zu dominieren beginnt. Weitere Bauelementverbesserungen werden dadurch unmöglich. Um dieses Quantenlimit des klassischen HEMT zu überwinden, entwickelt das Fraunhofer IAF MOSHEMTs (Metalloxidhalbleiter-HEMTs) mit InGaAs-Kanal, bei denen die Metall/Halbleiter-Schottky-Barriere durch eine Oxidschicht ersetzt wird, um die Tunnel-Leckströme zu unterdrücken. Dieser Ansatz kombiniert die Vorteile von III/V-Halbleitern und Silizium-MOSFETs und ermöglicht so die Elektronik der nächsten Generation, wie sie beispielsweise für die 5G- und 6G-Kommunikation benötigt wird.

In recent years we have managed to improve the outstanding radio frequency performance of high electron mobility transistors (HEMTs) by rigorous scaling of the gate length of the devices down to 20 nm. Due to this scaling, the HEMT has entered the quantum regime where the tunneling effect of the electrons starts to dominate the device characteristics and precludes further device improvements. To overcome this quantum limit of the classical HEMT, Fraunhofer IAF has started to develop InGaAs channels in metal oxide semiconductor high electron mobility transistors (MOSHEMTs) where the metal/semiconductor Schottky barrier is replaced by an oxide layer to suppress the tunnelling leakage currents. This approach combines the benefits of III-V semiconductors and silicon metal oxide semiconductor field effect transistors (MOSFETs) and enables next generation electronics such as for 5G and 6G communication.

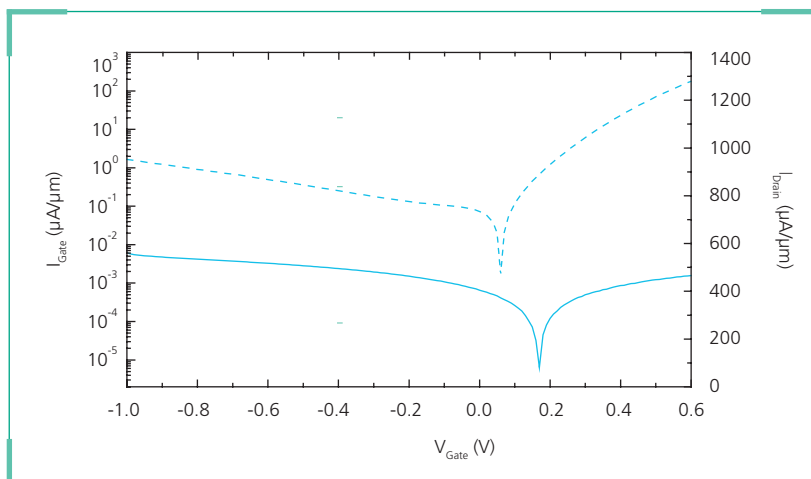


Dr. Arnulf Leuther
Deputy Head of
Department Technology
arnulf.leuther@iaf.fraunhofer.de

Arnulf Leuther researches ultra-high frequency electronics at IAF and develops transistors for frequencies beyond 600 GHz.

Da zwischen dem hochleitenden InGaAs-Kanal und dem Gatemetall eines 20-nm-HEMT nur 30 Atomlagen verbleiben, ist der Tunnel-effekt zum größten Faktor des zunehmenden Gate-Leckstroms geworden. Der Hauptvorteil von InGaAs – die dort vorherrschende außergewöhnlich hohe Elektronenmobilität – erweist sich hier als Haupthindernis für weitere Transistorverbesserungen. Dies liegt daran, dass die sehr hohe Elektronenbeweglichkeit mit einer sehr geringen effektiven Masse verbunden ist. Aufgrund des exponentiellen Anstiegs der Tunnelwahrscheinlichkeiten mit einer geringeren Barrierendicke und einer Verringerung der Masse hat die klassische InGaAs-HEMT-Technologie daher ihr Quantenlimit erreicht.

With only 30 atomic layers remaining in between the highly conductive InGaAs channel and the gate metal of a 20 nm HEMT, the tunneling quantum effect has become the dominating part in the increasing gate leakage current. Here, the major advantage of the InGaAs composition – its exceptionally high electron mobility – turns out to be the main obstacle to further transistor improvement. This is because the very high electron mobility is related to a very low effective mass. Due to the exponential increase of tunneling probabilities with lower barrier thickness and a reduction in mass, the classic InGaAs HEMT technology has reached its quantum limit.



1 The higher potential barrier of the gate oxide in the MOSHEMT results in a strong reduction of the gate leakage current (solid line) compared to the conventional Schottky barrier HEMT (dashed line).

NEUE TECHNOLOGIE ZUR ÜBERWINDUNG DES QUANTENLIMITS

Um die durch den Quantentunneleffekt bedingten Limitationen zu überwinden, ist ein Material mit einer deutlich höheren Barriere notwendig. Durch den Ersatz der Schottky-Barriere durch eine isolierende Al_2O_3 -Schicht konnten wir den Gate-Leckstrom um mehr

NOVEL TECHNOLOGY TO OVERCOME THE QUANTUM LIMIT

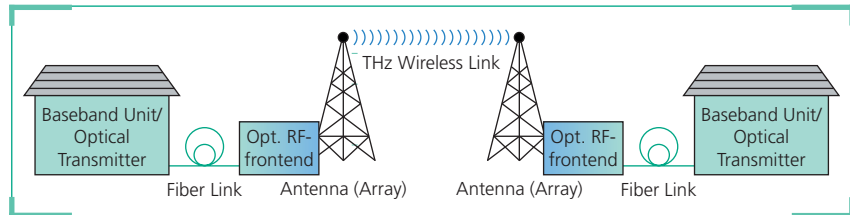
Overcoming the limitation induced by the quantum tunneling effect requires a material with a much higher barrier. By replacing the Schottky barrier in the HEMT with an isolating Al_2O_3 layer we were able to reduce the gate leakage current by more than a factor of 1000 (Fig. 1). The challenge in developing such a III-V metal oxide semiconductor HEMT (MOSHEMT) is the control of the semiconductor/oxide interface. Defect states located at or close to the interface are recharged by changing the gate bias, which reduces the control of the free carrier density in the semiconductor channel of the device and induces memory effects in the transistor characteristics. As a consequence, direct current (DC) and high frequency (RF) parameters such as transconductance can deviate from each other. By optimizing the deposition parameters and the precleaning process we were able to reduce the dispersion between DC and RF transconduction down



als den Faktor 1000 reduzieren (Abb. 1). Die Herausforderung bei der Entwicklung eines solchen III/V-Metalloxidhalbleiter-HEMTs (MOSHEMT) besteht in der Kontrolle der Halbleiter/Oxid-Grenzfläche. Defektzustände an oder nahe der Grenzfläche werden durch eine geänderte Gate-Vorspannung umgeladen, was die Steuerung der freien Ladungsträgerdichte im Halbleiterkanal des Bauelements erschwert und Memory-Effekte im Transistor hervorruft. Als Folge können Wechsellastparameter (DC) und Hochfrequenzparameter (HF) wie die Steilheit voneinander abweichen. Durch die Optimierung der Abscheideparameter für die Gateoxidschichten auf der InGaAs-Oberfläche und einen verbesserten Vorreinigungsprozess konnten wir die Dispersion zwischen DC- und HF-Steilheit der Transistoren auf 6 % reduzieren. Dies ist vergleichbar mit Werten, die wir für unsere metamorphe HEMT-Technologie erzielen. Bei metamorphen HEMTs nutzt man eine Pufferschicht zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen Gitterkonstanten, um Kristalldefekte zu reduzieren, die die Leistung des Bauelements beeinträchtigen würden.

DIE WELTWEIT ERSTE INTEGRIERTE SCHALTUNG MIT InGaAs-MOSHEMTS

Abb. 4 zeigt die Transferkennlinien unseres 20-nm-MOSHEMT, gemessen in Vorwärts- und Rückwärts-Drain-Spannungsrichtung. Die gute Übereinstimmung beider Kurven ist ein weiterer Beweis dafür, dass sich nur wenige Ladungsträger an der Grenzfläche festsetzen. Das Diagramm zeigt außerdem HEMT-ähnliche DC-Kennndaten, die wir mit unserer MOSHEMT-Technologie erreicht haben. Ein Grund für diese Verbesserung ist die Einführung einer $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ -Doppelschicht als Gate-Dielektri-



to 6 %, which is comparable to the dispersion level achieved with our metamorphic HEMT (mHEMT) technology. In a metamorphic HEMT a buffer layer is placed between two materials of different lattice constants in order to reduce crystal defects that would otherwise later affect the device performance.

THE WORLD'S FIRST InGaAs MOSHEMT MONOLITHIC MICROWAVE INTEGRATED CIRCUIT

Fig. 4 shows the transfer characteristics of our 20 nm MOSHEMT measured in forward and reverse drain voltage directions. The good match of both curves is a further proof for the low level of charge trapping at the interface. The diagram also shows the HEMT-like DC performance which we have achieved with our MOSHEMT technology. One reason for the performance improvement is the introduction of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ bilayer as a gate dielectric compared to the pure Al_2O_3 layers used at the beginning of our project. The improved process technology has achieved a record maximum oscillation frequency f_{max} of 640 GHz, representing the worldwide state-of-the-art for any MOSFET technology, including Si MOSFETs. Additionally, the oxide barrier offers the opportunity of integrating an electric field plate into the transistor layout for future high voltage operation.

2 Our next-generation monolithic microwave integrated circuits (MMICs) are used for wireless THz communication links, for instance in the EU project »TERRANOVA«, a cooperation with Fraunhofer HHI.

3 300 GHz receiver with horn antenna for 5G and 6G communication links containing the new generation of our low-noise 260 GHz amplifiers.

kum im Vergleich zu reinen Al_2O_3 -Schichten, die zu Beginn unseres Projekts verwendet wurden. Mit der verbesserten Prozesstechnologie konnten wir einen Rekord in der Oszillationsfrequenz f_{max} von 640 GHz erreichen, was den weltweiten Stand der Technik für jegliche MOSFET-Technologie, einschließlich Si-MOSFETs, darstellt. Zusätzlich bietet die Oxidbarriere die Möglichkeit, eine elektrische Feldplatte in den Transistoraufbau für einen zukünftigen Hochspannungsbetrieb zu integrieren.

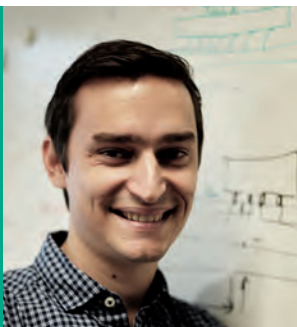
Sogenannte »THz-MMICs« für Frequenzen um 300 GHz und darüber sind aufgrund der großen Bandbreite in diesem Frequenzbereich von steigendem Interesse für Kommunikations- und Sensoranwendungen (Abb. 2, 3). Wir konnten die ersten InGaAs-MOSHEMT-MMICs der Welt realisieren. Die verbesserte Oszillationsfrequenz f_{max} des Transistors bildete die Basis für unsere neue geräuscharme 260-GHz-Verstärkergeneration mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 20 dB.

So-called »THz MMICs« for frequencies around 300 GHz and above are of increasing interest in communication and sensor applications thanks to the large bandwidth available in this frequency range (Fig. 2, 3). Integrating the MOSHEMT in the existing MMIC technology was therefore an important milestone in the project »TERRANOVA«, which is a cooperation with Fraunhofer HHI. At Fraunhofer IAF we were able to demonstrate the world's first InGaAs MOSHEMT MMIC. The improved transistor f_{max} provided the basis for our new 260 GHz low-noise amplifier generation with a small signal gain of more than 20 dB.

Arnulf Leuther



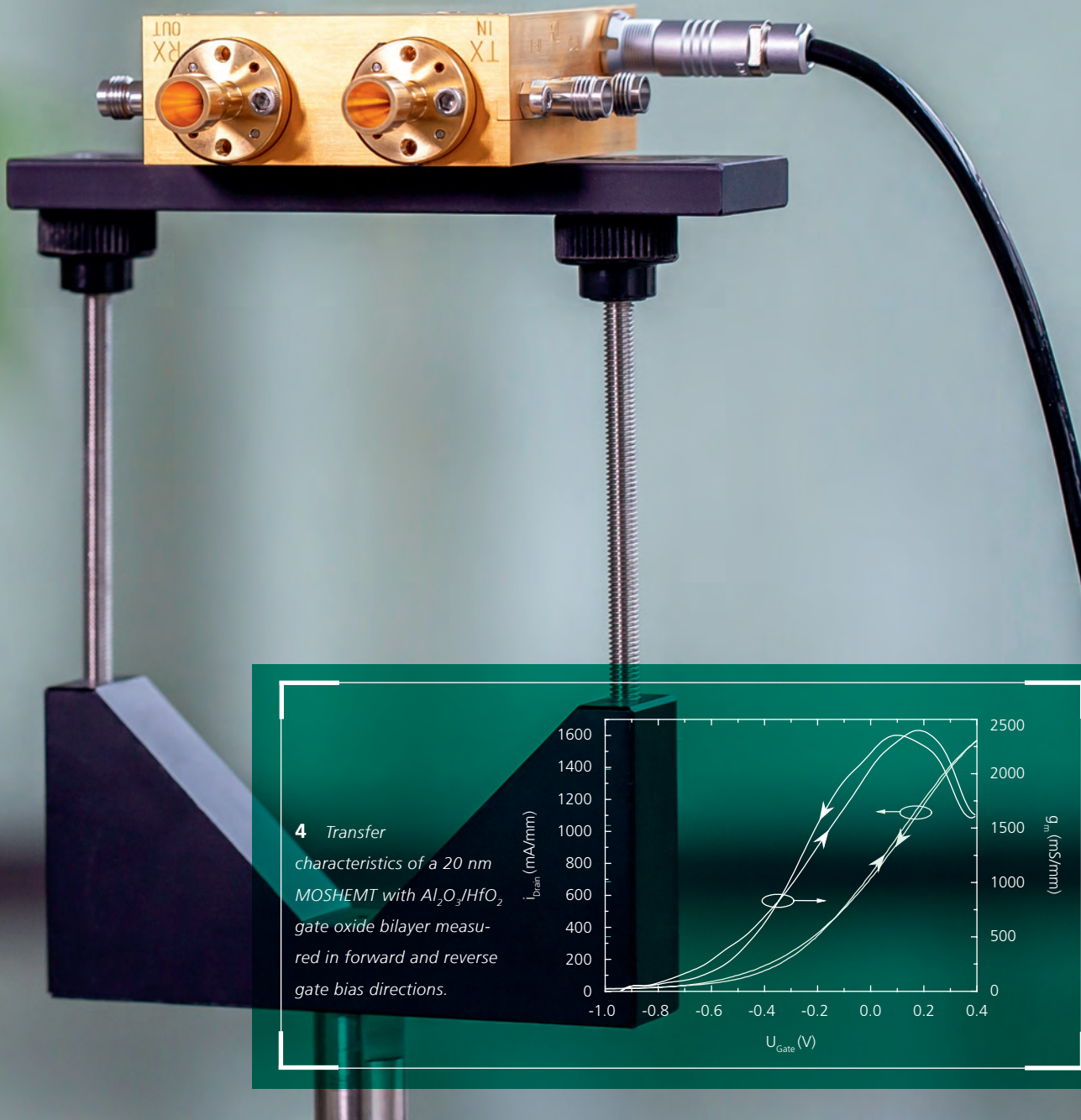
MORE
INFO



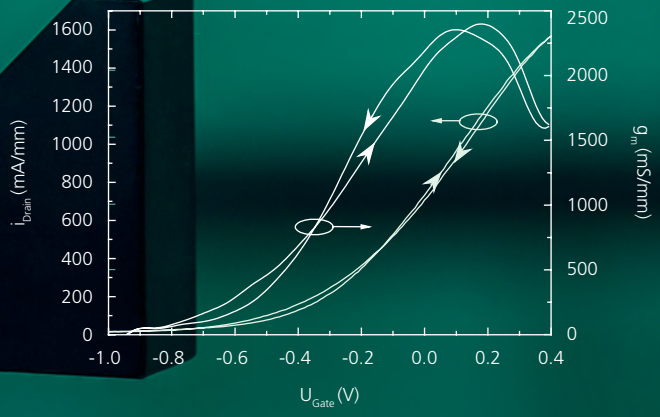
Lukas Czornomaz

Senior Engineer at IBM Research, Zurich

»Development of MOSHEMT technology is one of the keys in achieving RF performance beyond the reach of standard HEMTs and will be a serious contender in the emerging post-5G technological landscape. The reduction of the frequency dispersion down to mHEMT levels, which would have been deemed impossible some 10 years ago, paves the way for ultra-scaled MOSHEMTs eventually outperforming mHEMTs.«

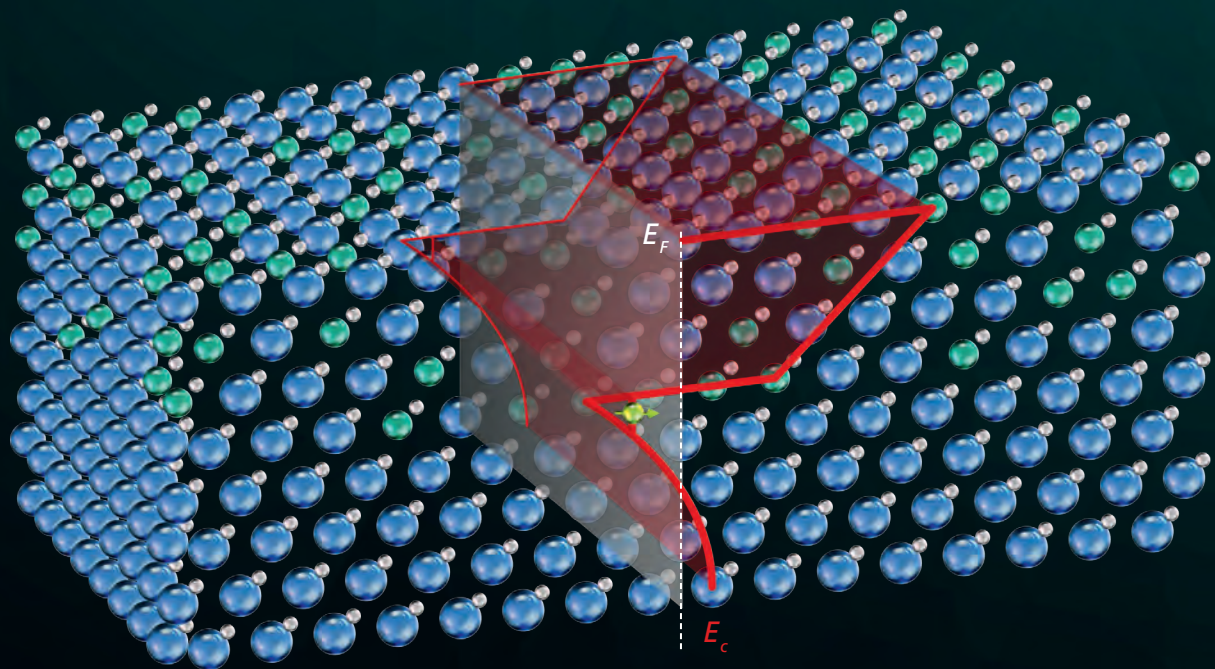


4 Transfer characteristics of a 20 nm MOSHEMT with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ gate oxide bilayer measured in forward and reverse gate bias directions.



QUANTISIERTE ELEKTRONENZUSTÄNDE

Quantized Electron States





Wird eine dünne Schicht eines hexagonalen Aluminiumgalliumnitrid-Kristalls (AlGaN) gitterangepasst auf einer Galliumnitrid-Schicht (GaN) abgeschieden, kann sich an der Grenze der beiden Kristallschichten eine ortsfeste und positiv geladene Flächenladung ausbilden. Bewegliche Elektronen werden durch diese Ladung angezogen und bilden ein zweidimensionales Gas, dessen potenzielle Energie quantisiert ist. Dieses Elektronengas eignet sich in hervorragender Weise als Kanal eines »High-Electron-Mobility«-Transistors.

In der schematischen Abbildung sind die Atome der beiden Kristallschichten dargestellt, so dass die Grenzfläche erkennbar ist. Das von oben nach unten verlaufende Band symbolisiert das Profil der Leitungsbandkante (E_c) relativ zur Fermi-Energie (E_f , gestrichelte Linie). An der Grenzfläche der Kristallschichten ist das Minimum der potentiellen Energie und der quantisierte Zustand der Elektronen sichtbar.

When a thin layer of a hexagonal aluminum gallium nitride crystal (AlGaN) is deposited on a gallium nitride (GaN) layer and the lattice is matched, a strong, stationary and positively charged interface can form at the boundary of the two crystals. Moving electrons are attracted by this charge and form a two-dimensional gas whose potential energy is quantized. This electron gas is outstandingly suited as a channel of a »high electron mobility« transistor.

The schematic illustration shows the atoms of the two crystal layers, so that the interface is visible. The band running from top to bottom symbolizes the profile of the conduction band edge (E_c) relative to the Fermi energy (E_f , dashed line). The minimum of the potential energy and the quantized state of the electrons can be observed at the interface of the crystal layers.

QUANTENSPRUNG IN DER KOMMUNIKATION: AKTIVE ANTENNEN FÜR 5G

Quantum Leap in Communication: Active 5G Antennae

Für neuartige Mobilkommunikationssysteme der 5. und 6. Generation sind Quanteneffekte entscheidend, um die Effizienz von Feldeffekttransistoren in Verstärkern und Schaltkreisen zu maximieren. Diese werden in den modernsten aktiven MIMO-Antennen (multiple input, multiple output) eingesetzt, die unsere Handys effizient mit höchsten Datenraten von mehr als 1 Gbit/s versorgen. Zu diesem Zweck hat das Fraunhofer IAF für diese neuen Antennen flächeneffiziente Galliumnitrid (GaN)-Schaltungen zwischen 0,5 und 6 GHz entwickelt. Einmal gesammelt, werden die Daten bei höheren Frequenzen durch GaN-Transistoren mit einer Gatelänge von 100 nm weiter ins Internet übertragen. Auch dort ermöglichen Quanteneffekte sehr hohe Leistungsdichten bei sehr hohen Datenraten, die dazu erforderlich sind, solch große Datenmengen von so vielen Nutzern bei 28 GHz und 39 GHz zu übertragen.

For novel 5G and 6G mobile communication systems quantum effects are critical to maximize the efficiency of field effect transistors in amplifiers and circuits. These are being used in the most modern active MIMO (multiple input, multiple output) antennae, which efficiently supply our cell phones at the highest data rates of more than 1 Gbit/s. To that end Fraunhofer IAF has developed area-efficient GaN circuits between 0.5 and 6 GHz to serve in these new antennae. Once collected, the data is relayed further at higher frequencies by GaN transistors with gate lengths of 100 nm into the internet. Again, quantum effects allow the achievement of very high power densities at the very high data rates required to transport all this data aggregated from many users into the internet at 28 GHz and 39 GHz.

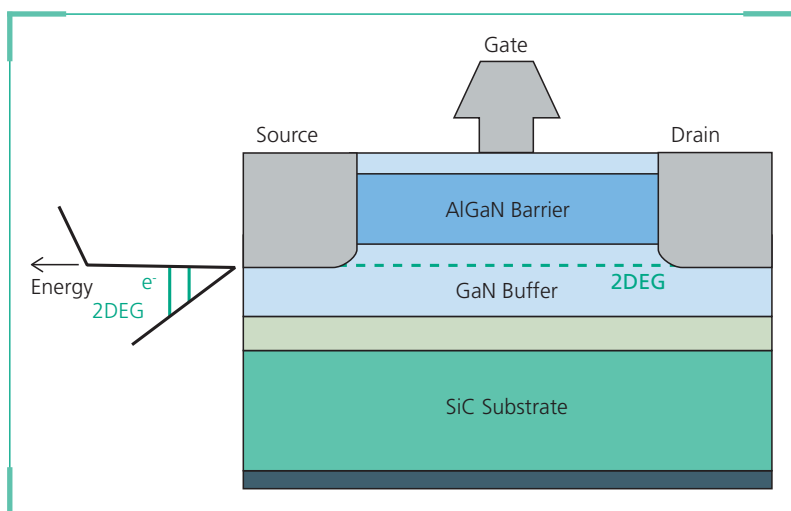


Dr. Rüdiger Quay
Head of Business Unit
Power Electronics
ruediger.quay@iaf.fraunhofer.de

Rüdiger Quay develops antennae for 5G and 6G communication which can make high-speed internet for everyone, everywhere become reality.

Das Streben nach höheren Datenraten und mehr Leistung der modernsten Mobiltelefone erfordert die Entwicklung fortschrittlicher Methoden wie MIMO (multiple input, multiple output, Abb. 3), um Datenverbindungen energieeffizient bereitstellen zu können. MIMO ermöglicht es, die Übertragung von Mikrowellen auf einen spezifischen Ort zu konzentrieren – Informationen werden nur dort bereitgestellt, wo sich der Benutzer gerade befindet. Dies verhindert den Verlust größerer Mengen an Energie in Bereichen, in denen sie nicht gebraucht wird, und gewährleistet eine räumlich effiziente und somit energiesparende Funktion des Systems. Dafür müssen die Antennenelemente (Abb. 2) etwa im Abstand der Wellenlänge angeordnet werden, bei 0,5–6 GHz entspricht dies Entfernungen von einigen Zentimetern. Leistungsverstärker mit hoher Flächeneffizienz werden benötigt – ein ideales Anwendungsfeld für Galliumnitrid-Transistoren und -Schaltungen.

The race to achieve ever increasing data rates and better usability and performance of the most modern cell phone terminals drives mobile communication infrastructure and requires the development of very advanced methods, such as MIMO (multiple input, multiple output) in order to ensure energy efficiency of the links. MIMO allows the concentration of the transmission of microwaves to a specific location, i.e. information is only provided where the user is currently located. This avoids the emission of larger amounts of power into areas where it is not used and ensures spatial and thus energy efficiency of the system. In order to build MIMO systems, the antenna elements (Fig. 3) have to be placed at wavelength spacing, i.e. a couple of centimeters for the frequency range 0.5 to 6 GHz. This again requires the realization of power amplifiers with high area efficiency, for which gallium nitride transistors and circuits are ideally suited.



1 Quantum effects in a GaN field effect transistor cause the formation of a two-dimensional electron gas (2DEG).

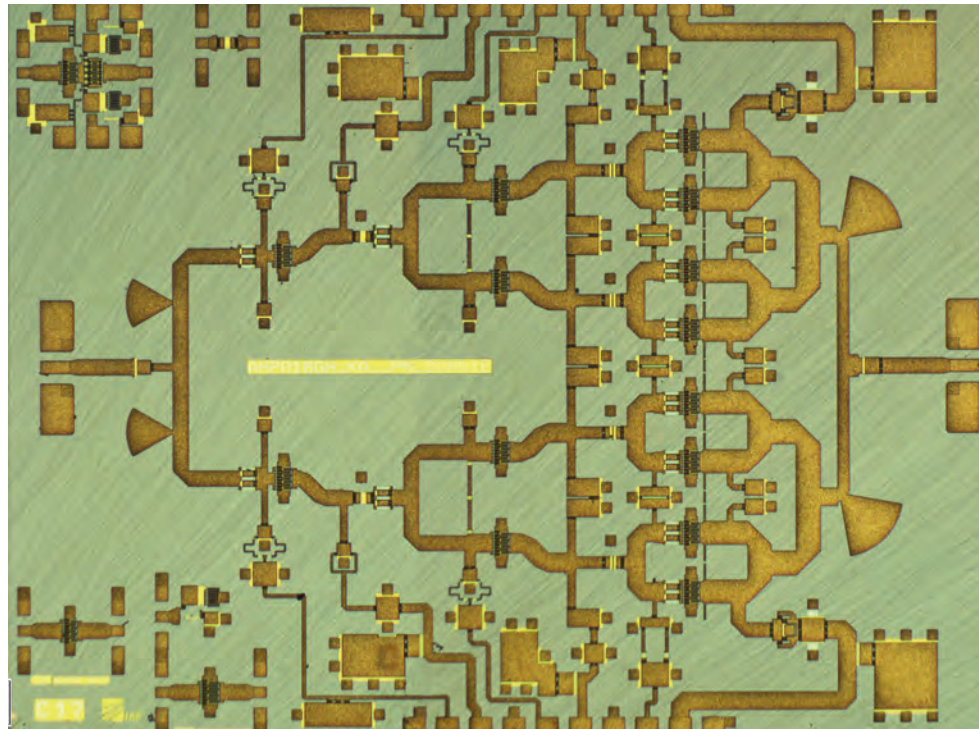
QUANTUM TECHNOLOGY IN THE GATE CHANNEL

One of the main concerns of microwave transmission, in order to reduce the power consumption of RF devices, and thus the energy cost for all users, is to control the charging of the carriers efficiently. This essentially means that the electrons in the transistors have to be kept in certain regions of the devices where they can be most easily modulated. Quantum effects help to achieve this in a variety of ways: a simple way to achieve the confinement of electrons is to guide them along a well-defined material change within a semiconductor crystal. Nature has given us various tools for this, e.g. the change of the material composition of the crystal through growth. If the interface between the two materials is only a few nano-



QUANTENTECHNOLOGIE IM GATEKANAL

Einer der wichtigsten Punkte zur Verringerung des Energieverbrauchs von Hochfrequenz-Bauelementen besteht darin, die Ladung der stromführenden Elektronen effizient zu steuern. Dies bedeutet, dass die Elektronen in den Transistoren in den Bereichen des Bauelements gehalten werden müssen, wo sie mit größter Leichtigkeit moduliert werden können. Quanteneffekte helfen hier auf vielfältige Weise: Ein einfacher Weg, um die Begrenzung von Elektronen physikalisch zu erreichen, besteht darin, sie entlang einer wohldefinierten Materialgrenze innerhalb eines Halbleiterkristalls zu führen. Dafür hat uns die Natur verschiedene Werkzeuge gegeben, z. B. den Wechsel der Materialkomposition des Kristalls durch Wachstum. Beträgt die Ausdehnung der betrachteten Zone an der Grenzfläche zweier Materialien nur wenige Nanometer (10^{-9} m), so bemerkt man die Quanteneffekte. Sie treten bei Materialien wie GaN oder GaAs bei Dicken von 20 nm oder weniger auf. Wird der Materialübergang richtig gewählt, bildet sich ein dreieckiger energetischer Quantentopf aus (Abb. 1), da sich die Leitungsbänder der beiden Materialien an der Grenzfläche anpassen müssen. Die Elektronen können so ihren energetischen Zustand auf einer Seite der Grenzfläche reduzieren, mit der Folge, dass die Elektronen sich auf einer Seite konzentrieren, ohne dass dort dotiert werden muss. Die Grenzfläche bedingt so eine verbesserte Positionierung der freien Elektronen im Kristall. Die Elektronen können dann entlang eines definierten Pfads geleitet werden, auf dem sie mit quantenbedingt besseren Transporteigenschaften wie der Beweglichkeit und der Geschwindigkeit gleiten. Physikalisch wird dies »zweidimensio-



ners (10^{-9} m) thick, quantum effects will set in. In materials such as GaN or GaAs this happens with thicknesses of 20 nm or less. If the material transition is properly selected, a triangular energetic quantum well forms (Fig. 1), since the conduction bands of the two materials have to adopt at the interface. The electrons will reduce their energy state on one side of this interface with the consequence that the electrons concentrate on one side without the material having to be doped there. Thus, the interface results in an improved positioning of the free electrons in the crystal. The electrons can then be guided along a defined path in which they move with better quantum-related transport properties such as mobility and velocity. Physically this is called a »two-dimensional electron gas« (2DEG, Fig. 1). Quantum effects in the 2DEG also ensure that the electrons do not move away from the interface. This is particularly attractive because the current can be in-

2 Antenna elements in a GaN MMIC link amplifier for 27–36 GHz with a high efficiency of 25% and output powers of 6–9 Watt.

nales Elektronengas« genannt (2DEG, Abb. 1). Quanteneffekte in dem 2DEG stellen damit auch sicher, dass sich die Elektronen nicht von der Grenzfläche entfernen. Dies ist besonders attraktiv, da der Strom durch makroskopische Felder oder Wellen unterbrochen oder moduliert werden kann. So kann durch eine Spannung eine starke Differenz zwischen dem Ein- und dem Ausschaltstrom oder -zustand des Transistors erreicht werden, die proportional zu einem guten Wirkungsgrad des Bauelements und damit der aktiven Antenne ist.

DATENRATEN UND ERGEBNISSE DES IAF

Für aktive Antennen wie auch für Link-Anwendungen für 5G zeigt Abb. 2 einen kürzlich realisierte MMICs des IAF mit 6 – 9 W Ausgangsleistung und einem Wirkungsgrad von 25 % bei Frequenzen von 27–36 GHz in einem Band. Damit sind alle wesentlichen Bänder abgedeckt. Derzeit wird ferner die Gatelänge neuer Transistoren auf 50 nm skaliert, was es uns ermöglicht, GaN bis zu einer Frequenz von etwa 200 GHz zu verwenden, bzw. bei niedrigeren Frequenzen effizienter zu modulieren und somit »Strom« zu sparen.

Quanteneffekte sind auch bei der Skalierung der Bauelemente für höhere Frequenzen wichtig, die durch die Reduzierung der Länge der Gatestruktur erreicht wird. Dadurch können die Transistoren mit höheren Frequenzen im mm-Wellenbereich arbeiten. Nur so wird die Kombination von hohen Datenmengen für viele Benutzer bei hohen Frequenzen und damit größer Bandbreite mit hoher Leistung durch die Luft für 5G-Datenraten > 1 Gbit/s ermöglicht.

errupted or modulated by macroscopic fields or waves. For example, a voltage can produce a strong difference between the switch-on and switch-off current or state of the transistor, which is proportional to a high efficiency of the device and thus of the active antenna.

DATA RATES AND RESULTS AT IAF

For active antennas as well as data link applications for 5G, Fig. 2 shows an IAF MMIC with 6–9 W output power with 25 % efficiency at frequencies of 27–36 GHz in one band. This covers all essential frequency bands. Furthermore, the gate length of new transistors is currently being scaled to 50 nm, which enables us to use GaN up to a frequency of about 200 GHz or to modulate more efficiently at lower frequencies and thus to save »power«.

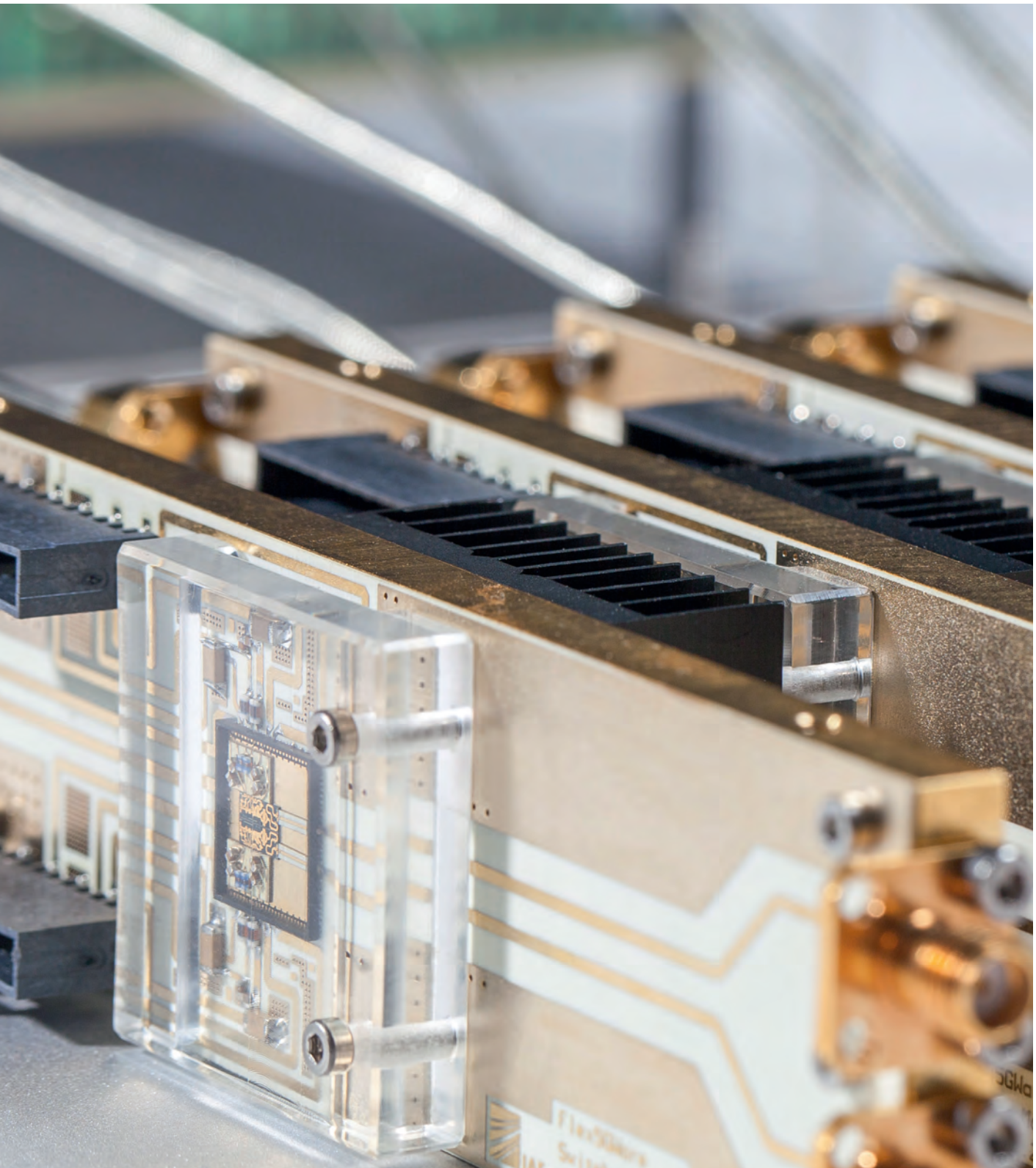
Quantum effects are also important in the scaling of devices for higher frequencies, which is achieved by reducing the length of the gate structure. This allows the transistors to operate at higher frequencies in the millimeter-wave range. Only this enables the combination of high data volumes for many users at high frequencies and thus large bandwidth with high performance through the air for 5G data rates > 1 Gbit/s.

Rüdiger Quay



MORE
INFO



**Prof. Christian Fager**

Chalmers University of Technology, Gothenburg

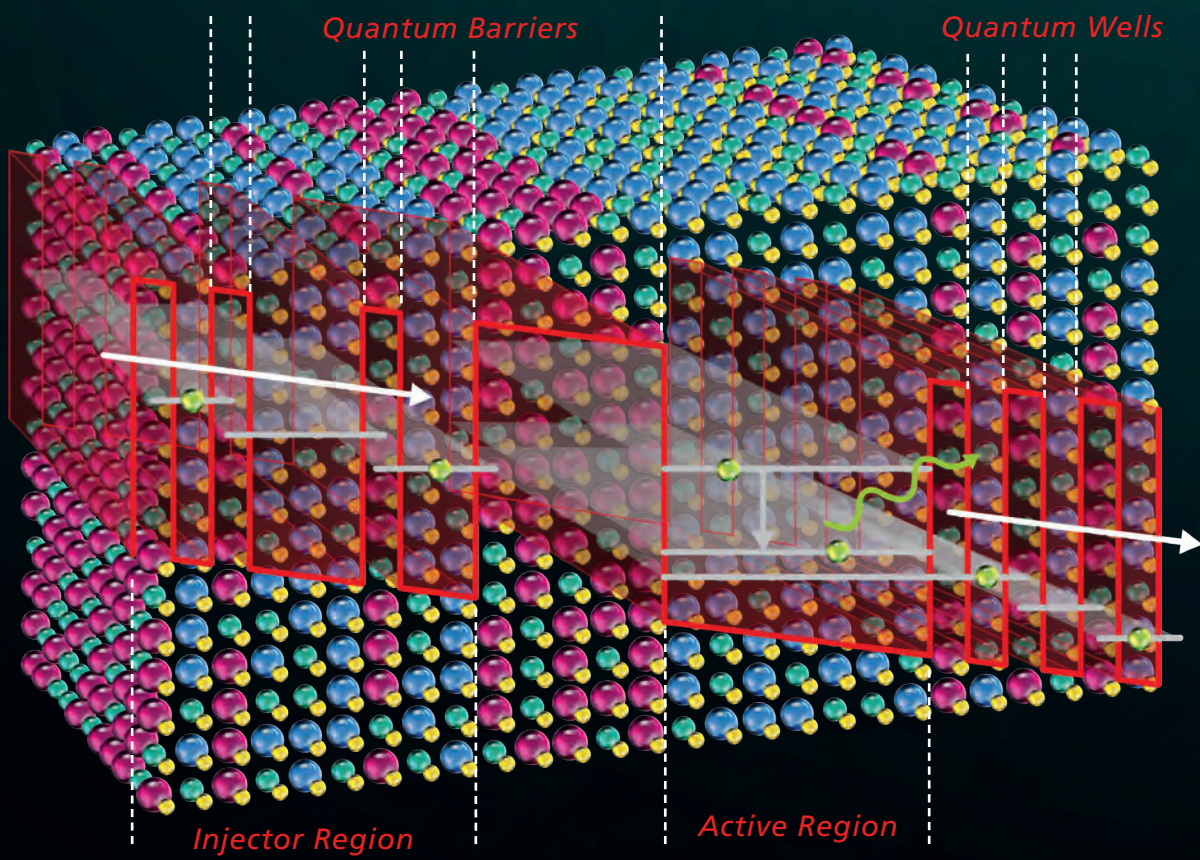
»By combining modelling tools developed at Chalmers with GaN power amplifiers and antenna designs developed at IAF we have been able to better understand the behavior and component requirements in 5G active antenna designs for MIMO transmitters for future communication systems.«



PARTNER

QUANTENKASKADENLASER

Quantum Cascade Lasers





Im Quantenkaskadenlaser wird das Licht nicht durch die strahlende Rekombination eines Elektrons des Leitungsbands mit einem Loch des Valenzbands des Halbleiters erzeugt, sondern durch Intersubband-Übergänge von Elektronen innerhalb des Leitungsbands. Dazu wird eine Reihe von Halbleiterschichten als zweidimensionale Quantentöpfe hergestellt, die mehrere quantisierte Energieniveaus besitzen. Durch Anlegen einer Spannung werden die quantisierten Energieniveaus angrenzender Quantentöpfe so zueinander ausgerichtet, dass Elektronen durch quantenmechanisches Tunneln von einem niedrigen Energieniveau des einen Quantentopfs in ein hohes Energieniveau eines anderen gelangen können. Dann kann der Energieunterschied zwischen hohem und niedrigem Energieniveau in Form von Photonen abgegeben und die nächste gleichartige Halbleiterkaskade durchlaufen werden. Der für die Emission relevante Bereich besteht aus zwei unterschiedlichen Zonentypen, die sich mehrmals abwechselnd wiederholen, nämlich Emissionszone und Injektorbereich. Am Fraunhofer IAF werden 700 Halbleiter-Kristallschichten mit Dicken zwischen 10 und 30 Atomlagen aufeinander gewachsen, um Quantenkaskadenlaser mit 35 Emissionszonen und Injektorbereichen zu erzeugen. In der schematischen Abbildung ist ein Injektorbereich und eine Emissionszone aus einer InAlAs/InSbAs-Schichtfolge gezeigt. Das rote Band zeigt den Verlauf der Leitungsbandkante (E_c) bei Anlegen einer äußeren Spannung über die Schichtfolge hinweg. Die Energiezustände (graue Linien) und Elektronen (grüne Kugeln), die zur Lichterzeugung (grüner Pfeil) führen, sind in den Potentialtöpfen der Laserstruktur angedeutet.

In the quantum cascade laser, light is not generated by the radiative recombination of an electron of the conduction band with a hole in the valence band of the semiconductor, but by intersubband transitions of electrons within the conduction band. For this purpose, a series of semiconductor layers is produced as two-dimensional quantum wells with several quantized energy levels. By applying a voltage, the quantized energy levels of adjacent quantum wells are aligned so that electrons can pass through quantum mechanical tunnelling from a low energy level of one quantum well to a high energy level of another. Then, the energy difference between high and low energy levels can be emitted in the form of photons and the next similar semiconductor cascade can be traversed. The emission-relevant region consists of two different types of zones, which are repeated alternately several times, namely the emission zone and the injector region. At Fraunhofer IAF, 700 semiconductor crystal layers with thicknesses between 10 and 30 atomic layers are grown to produce quantum cascade lasers with 35 emission zones and injector areas. The schematic illustration shows an injector region and an emission zone from an InAlAs/InSbAs layer sequence. The red band illustrates the course of the conduction band edge (E_c) when an external voltage is applied across the layer sequence. The energy states (gray lines) and electrons (green spheres) leading to light generation (green arrow) are indicated in the potential wells of the laser structure.

QUANTENKASKADENLASER FÜR SPEKTROSKOPIE-ANWENDUNGEN

Quantum Cascade Lasers for Spectroscopy

Quantenkaskadenlaser (QCLs) sind ein perfektes Beispiel für die Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit der Quantentechnologie. In den letzten zwei Jahrzehnten haben sie große Entwicklungen in der Photonik im mittleren und fernen Infrarot ausgelöst. Aktuelle Anwendungsgebiete von QCLs sind unter anderem schnelle und hochauflösende Spektroskopie, Schadstoffüberwachung, auf Atemgasanalyse basierende medizinische Diagnostik, industrielle Prozesskontrolle und Sicherheitstechnologie. Das Fraunhofer IAF arbeitet an der Spitze der QCL-Entwicklung und entwickelt hochintegrierte QCLs mit externem Resonator (EC-QCLs) für den mittleren Infrarotbereich, die einzigartige spektrale Scangeschwindigkeiten mit extrem geringer Baugröße kombinieren. Solche breit abstimmbaren Laserquellen können als Baustein für viele neuartige Spektroskopiesysteme in verschiedensten Anwendungsbereichen dienen.

Quantum cascade lasers (QCLs) are a refined example of the power and versatility of quantum engineering. These devices have in fact triggered big developments in mid- and far-infrared photonics over the last two decades. QCLs currently find application in high-speed and high-resolution spectroscopy, pollution monitoring, breath analysis-based medical diagnostics, industrial process control and homeland security. Fraunhofer IAF works at the forefront of QCL development and builds highly integrated external cavity QCLs (EC-QCLs) for the mid-infrared wavelength regime that combine unique spectral scanning speeds with an extremely small footprint. Such broadly tuneable laser sources can be the building block for many novel spectrometer systems in various applications.



Dr. Marko Härtelt
Group Leader
Laser Characterization
marko.haertelt@iaf.fraunhofer.de

Marko Härtelt heads the application laboratory for infrared laser spectroscopy, where customers can carry out test measurements.

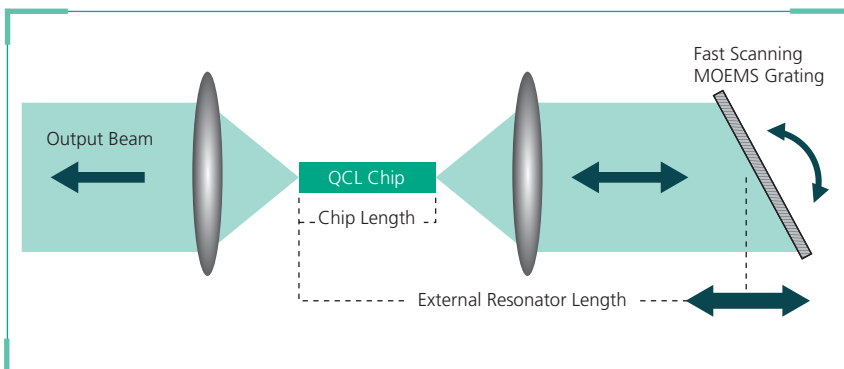
DIE QUANTENWELT DER QCLs

Die Vielseitigkeit von QCLs beruht auf sehr wenigen fundamentalen Gesetzen der Quantenphysik. Um die Funktionsweise von QCLs zu erklären, verlassen wir den Rahmen der klassischen Physik und nutzen Konzepte der Quantentechnologie: Quanten-Confinement, Tunneln und Kohärenz. Das sorgfältige Gleichgewicht dieser Komponenten führt dazu, dass ein in die Struktur injiziertes Elektron eine Energielandschaft voller Täler (Quantentöpfe) und Berge (Quantenbarrieren) vorfindet, die es unter Umwandlung seiner Energie in Licht durchquert. Allerdings wird nicht wie bei Diodenlasern die gesamte Energie auf einmal umgesetzt, sondern kaskadiert, wobei in jedem Schritt ein Lichtquant mit der gleichen Frequenz emittiert wird (Abb. 2). Die Energie der Lichtquanten wird durch die Auswahl der richtigen Dicken und atomaren Zusammensetzungen der Quantentöpfe und Barrieren bestimmt, was ein breites Spektrum möglicher Emissionsfrequenzen abdeckt.

THE QUANTUM WORLD OF QCLs

The versatility of QCLs originates in very few fundamental laws of quantum physics. To explain the operation of QCLs, one needs to depart from the framework of classical physics and grab concepts from the pillars of quantum technology: quantum confinement, tunnelling and coherence. The careful balance of these components leads to the fact that an electron externally injected into a device will see an energy landscape full of valleys (quantum wells) and mountains (quantum barriers), a landscape that this electron will cross by converting its energy into light. Not all its energy is converted at once, however, as in the case of diode lasers, but rather in a stepwise, cascading manner, emitting a quantum of light of the same frequency at each step (Fig. 2). The energy of the light quanta is determined by choosing the right thickness and atomic composition of the quantum wells and barriers, so that a wide emission frequency is covered.

Of special importance in the design of QCLs are the quantum barriers, whose thicknesses (typically a few nm) are chosen to be thick enough to allow for spatial localization (confinement) of electrons at different sides of the barriers, but thin enough to allow a reasonable degree of interaction (quantum mechanical coupling) between them. By choosing the appropriate barrier thicknesses, a process known as »resonant tunnelling« is triggered, which allows coherent (i. e. ordered) transport of electrons across the device. Quantum technology has allowed the development of QCLs from a theoretical idea back in 1971 through their lab realization in 1994 to the global marketplace today.



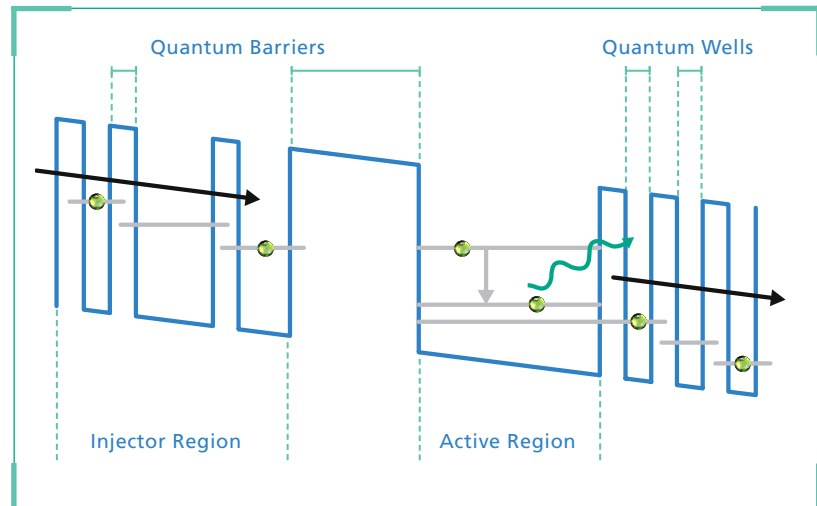
1 Basic setup for a high-resolution MOEMS-based laser source. The external resonator length and laser current are scanned simultaneously.



Von besonderer Bedeutung für das Design von QCLs sind die Quantenbarrieren, deren Dicken (typischerweise einige nm) so gewählt sind, dass sie dick genug sind, um Elektronen auf verschiedenen Seiten der Barrieren räumlich zu lokalisieren, aber dünn genug, um den gewünschten Grad an Wechselwirkung (quantenmechanische Kopplung) zu erlauben. Durch die Wahl der geeigneten Barrierendicken wird ein Prozess ausgelöst, der als resonantes Tunneln bekannt ist und einen kohärenten (d. h. geordneten) Transport von Elektronen durch das Bauelement ermöglicht. Die Quantentechnologie ermöglichte die Entwicklung von QCLs von einer theoretischen Idee im Jahr 1971 über ihre Laborrealisierung im Jahr 1994 hin zur heutigen Verfügbarkeit von QCLs auf dem globalen Markt.

MOEMS-BASIERTE QCLs MIT EXTERNER KAVITÄT UND IHRE ANWENDUNGEN

Am Fraunhofer IAF arbeiten wir derzeit an hochintegrierten EC-QCLs, welche die ideale Lichtquelle für die »Fingerprint«-Spektroskopie darstellen. Mit Hilfe von mikrooptisch-elektromechanischen (MOEMS) Beugungsgitter-Scannern des Fraunhofer IPMS haben wir eine extrem kompakte und robuste Laserquelle entwickelt, mit welcher der gesamte Wellenlängenbereich des QCL-Emitters innerhalb von 1 ms abgetastet werden kann. Dieses Lasermodul (Abb. 3) ist die Grundlage für eine durchstimmbare Lichtquelle, die in einer Vielzahl von Sensorsystemen verwendet werden kann. Seine Eigenschaften ermöglichen neuartige und innovative Anwendungen wie handgehaltene Geräte zur berührungslosen Identifizierung von Gefahrstoffen sowie zur schnellen Inline- und Online-Prozesskontrolle.



MOEMS-BASED EXTERNAL CAVITY QCLs AND THEIR APPLICATIONS

At Fraunhofer IAF we currently work on highly integrated EC-QCLs, which are the ideal light source for fingerprint spectroscopy. By using micro-optical-electromechanical system diffraction grating scanners (MOEMS) provided by Fraunhofer IPMS, we have developed an extremely compact and robust laser source, which allows the scanning of the full wavelength range of the QCL emitter within 1 ms. This extremely compact and robust laser module (Fig. 3) is the basis of a tuneable light source which can be used in a variety of sensing systems. Its small footprint and fast measurement speed permit novel and innovative applications such as handheld devices for stand-off detection of solid residuals of hazardous substances, as well as for fast inline and online process control.

2 Electrons injected into a biased QCL undergo a series of transitions into the active region, where spontaneous emission of light occurs. The electrons subsequently undergo non-radiative transitions into the next active region, where the interaction with the increasing optical field can cause stimulated emission.

HOCHAUFLÖSENDE SPEKTROSKOPIE MIT MOEMS-BEUGUNGSGITTER

Im EU-Projekt »AQUARIUS« wollen wir das Intensitätsrauschen von MOEMS-QCLs reduzieren und ihre Funktionalität erweitern.

Durch eine Synchronisierung der MOEMS-Gitterbewegung mit der externen Resonatorlänge und der Anpassung des Laserstroms (Abb. 1) haben wir die Fähigkeit des Lasers demonstriert, hochauflösende Gasspektroskopie über einen breiten spektralen Abstimmbereich hinweg zu ermöglichen (Abb. 4).

Durch unsere Expertise bei der Manipulation von elektronischen Zuständen sowie von Transporteigenschaften bei Elektronen innerhalb der QCL und dank unseres Wissens über die longitudinalen Modeeigenschaften von Resonatoren ist es uns möglich, maßgeschneiderte IR-Laserquellen zu entwickeln und innovative sowie extrem kompakte Laserquellen auf dem Markt zu etablieren.

HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY USING A MOEMS DIFFRACTION GRATING

Within the EU project »AQUARIUS«, we aim for low intensity noise and extended functionality of the MOEMS-QCL.

By synchronizing the movement of the MOEMS grating with the tuning of the laser current and the external cavity length (Fig. 1) we have demonstrated the ability of the laser to perform high-resolution gas spectroscopy over a broad spectral tuning range (Fig. 4).

Our expertise in manipulating the electronic states and the electron transport properties within the QCL, as well as our knowledge of the longitudinal mode properties of resonators, allows us to develop custom-made mid-IR laser sources with respect to emission wavelength, tuning range and spectral resolution, ideally matched to their application, and to establish innovative and extremely compact laser sources on the market.

Marko Härtelt



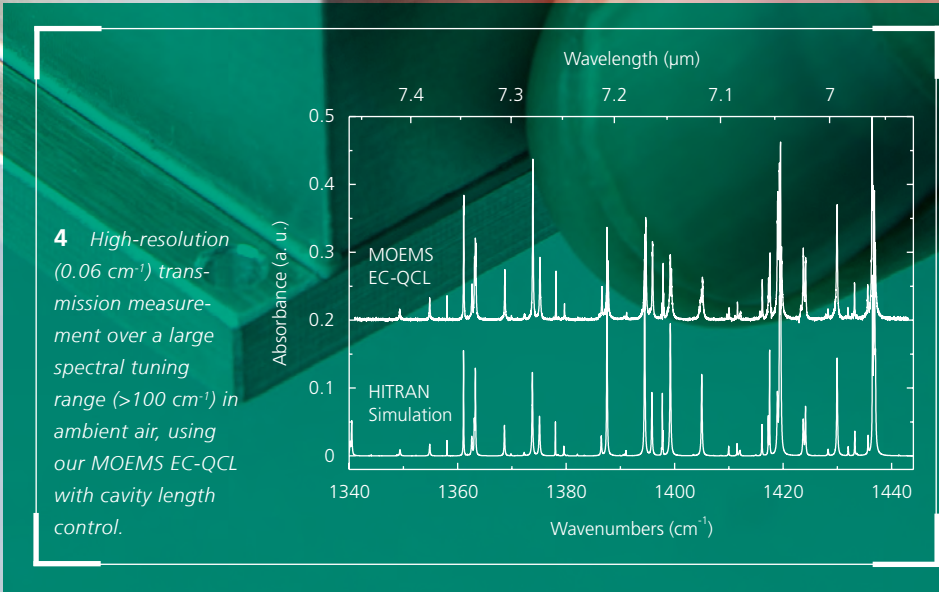
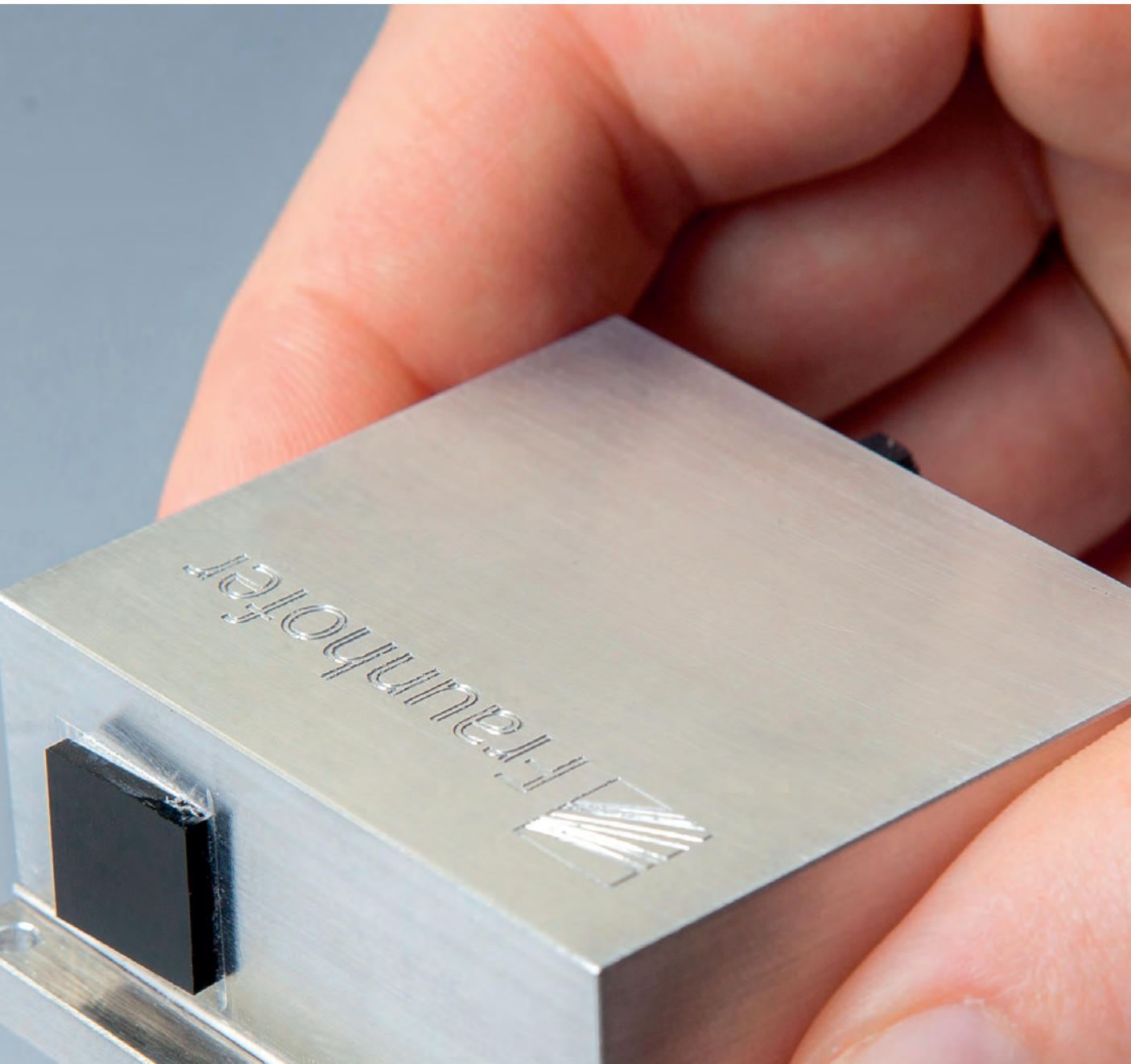
MORE
INFO



Prof. Dr. Bernhard Lendl

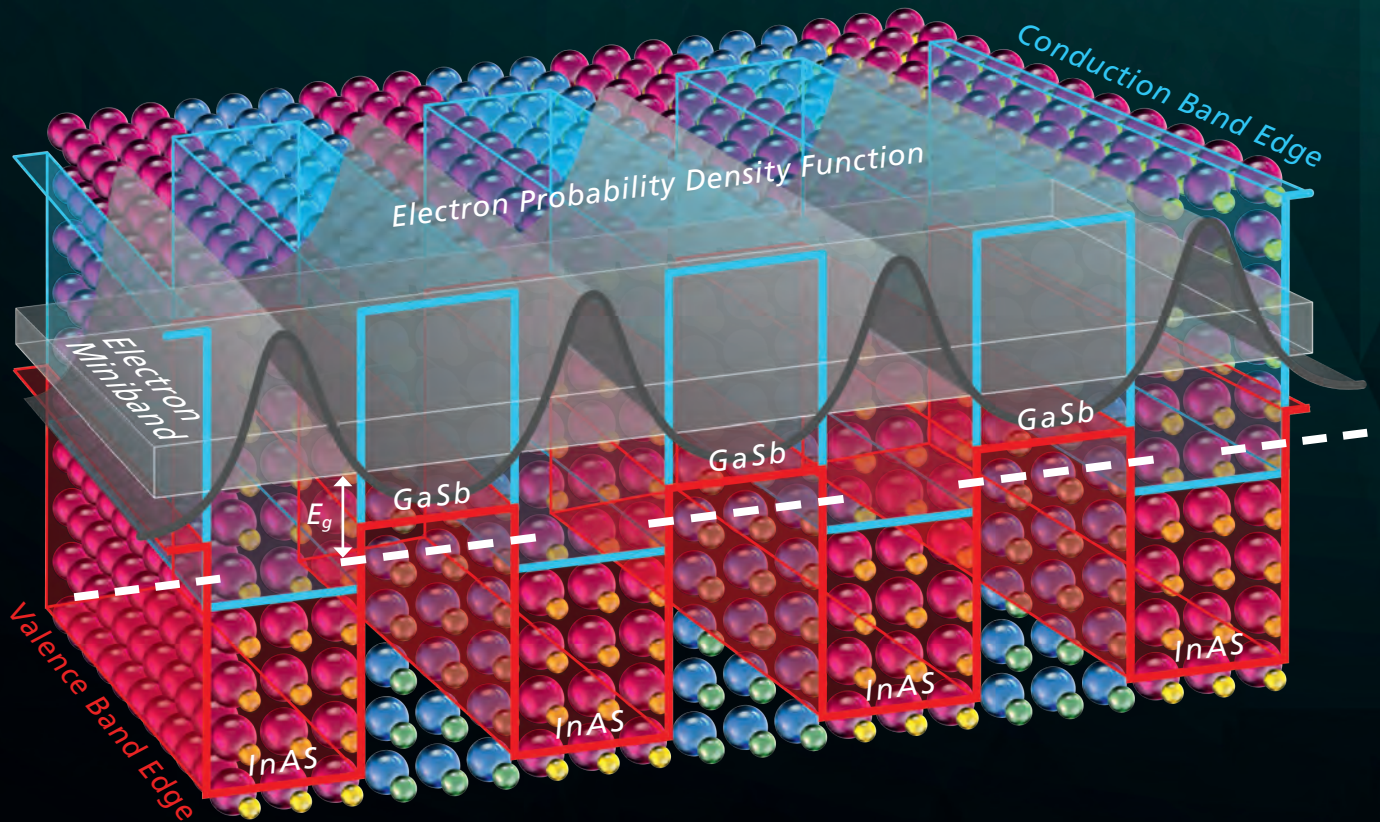
Vienna University of Technology, Vienna

»Quantum cascade lasers are the epitome of the technical application of quantum mechanics in sensor technology. With their help, completely new measuring methods can be developed for medicine or industrial process analysis.«



QUANTUM-WELL-PHOTODETEKTOR

Quantum Well Photodetector





Ein Quantum-Well-Photodetektor ist ein Detektor für Licht, der quantisierte elektronische Übergänge in Quantentöpfen verwendet, um Photonen zu absorbieren. Um die empfindliche Detektion von langwelliger Infrarotstrahlung zu ermöglichen, können Übergitter aus Indiumarsenid- (InAs) und Galliumantimonid-Schichten (GaSb) verwendet werden. Die dünnen InAs-Quantentöpfe werden so dicht nebeneinander positioniert, dass ihre quantisierten Grundzustände räumlich überlappen und ein Miniband für Elektronen ausbilden. Aufgrund des Profils der Leitungsbandkante konzentrieren sich die Elektronen in den InAs-Schichten. Quantisierte Zustände für Löcher bilden sich in den extrem dünnen GaSb-Schichten aus. Photonen werden dann absorbiert, wenn ihre Energie der Energiedifferenz zwischen dem quantisierten Zustand für Löcher in den GaSb-Schichten und dem darüber liegenden Miniband entspricht.

In der Grafik sind die Bänder für den Verlauf der Leitungs- (blaues Band) und Valenzbandkante (rotes Band) über die InAs/GaSb-Schichtstruktur hinweg gezeigt. Angedeutet ist das Miniband (graue Schicht) und die Elektronenverteilungsfunktion (graue Linie) sowie die quantisierten Zustände für die Löcher (gestrichelte weiße Linien).

A quantum well photodetector is a light detector that uses quantized electronic transitions in quantum wells to absorb photons. To enable sensitive detection of long-wave infrared radiation, superlattices of indium arsenide (InAs) and gallium antimonide (GaSb) layers can be used. The thin InAs quantum wells are positioned so close to each other that their quantized ground states spatially overlap and form a miniband for electrons. Due to the profile of the conduction band edge, the electrons are concentrated in the InAs layers. Quantized states for holes are formed in the extremely thin GaSb layers. Photons are absorbed when their energy corresponds to the energy difference between the quantized state for holes in the GaSb layers and the miniband above.

The schematic illustration shows the bands for the conduction band edge (blue) and valence band edge (red) across the InAs/GaSb layer structure. The miniband (grey bar) and the electron distribution function (gray line) as well as the quantized states for the holes (dashed white lines) are indicated.

NUTZUNG DES »QUANTUM CONFINEMENTS« FÜR HOCHLEISTUNGSFÄHIGE INFRAROTDETEKTOREN

Leveraging Quantum Confinement for High-Performance Infrared Detectors

In modernen Systemen, die das Unsichtbare sichtbar machen, ist die Quantentechnologie längst unerlässlich geworden. Die Fülle an Informationen im Infrarotbereich kann mithilfe einer Vielzahl von bekannten Techniken nutzbar gemacht werden. Dabei sind oftmals Infrarotdetektoren höchster Leistungsfähigkeit die Schlüsselkomponenten. Seit mehr als zwei Jahrzehnten ist das Fraunhofer IAF durchgehend an der Spitze der Entwicklung bei Infrarot-Detektoren, welche sogenanntes »Quantum Confinement« nutzen. Unsere fortschrittliche InAs/GaSb Typ-II-Übergittertechnologie hat ein »Technology Readiness Level« von 8 erreicht und hilft beim Schutz der Bundeswehr und deren Alliierten, indem es deren Lufttransport in Einsatzgebiete und zurück nach Hause sichert. Die Kombination von Quantenphysik und moderner III/V-Halbleitertechnologie ermöglicht, was zuvor als unmöglich galt.

Quantum technology is vital in modern systems making the invisible visible. In particular, the wealth of information concealed in the infrared part of the electro-magnetic spectrum can be exploited by numerous, well-known techniques. High-performance infrared photon detectors are often the key enabling component. For more than two decades, Fraunhofer IAF has consistently been at the forefront of the development of infrared photodetectors leveraging quantum confinement. Today, our advanced bispectral InAs/GaSb type-II superlattice technology has reached a technology readiness level of 8 and already helps to protect German and allied military forces during their air transport to areas of operation and back home. Quantum physics combined with contemporary III-V semiconductor manufacturing technology allows the solution of tasks previously considered impossible.



Dr. Robert Rehm
*Head of Business Unit
Photodetectors
robert.rehm@iaf.fraunhofer.de*

*Robert Rehm has been
researching infrared and UV
detectors at Fraunhofer IAF
since 1996.*

Wie es das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt, liegt die maximale thermische Emission von herkömmlichen Objekten mit einer Oberflächentemperatur von wenigen hundert Grad Celsius im mittleren (MWIR, 3–5 μm) bzw. im langwelligen Infrarotbereich (LWIR, 8–12 μm). Viele Moleküle absorbieren und emittieren hier eine charakteristische Strahlung gleich einem chemischen Fingerabdruck. Die Hochleistungsdetektion im thermischen Infrarotbereich ermöglicht daher z.B. passive Nachtsicht, thermische Fernerkundung, Umweltobservierung, Spektroskopie und weltraumbasierte Anwendungen zur Erdbeobachtung und zur Astronomie. Hochleistungs-IR-Detektoren beruhen auf der direkten Photon-zu-Elektron-Konversion in Halbleiterbauelementen, in welchen die Bandlücke an die erforderliche langwellige Detektionsgrenze angepasst ist. In der Natur finden sich nur zwei geeignete Halbleitermaterialien zur Detektion im MWIR und im LWIR. Während die feststehende Bandlücke von InSb lediglich eine monochrome Detektion bis zu einer fixen Detektionsgrenze um 5,6 μm erlaubt, können hochempfindliche HgCdTe-Detektoren zwar den gesamten thermischen Infrarotbereich erfassen, leiden aber gerade bei extrem langen Wellenlängen unter geringer Ausbeute und hohen Kosten. Außerdem bedrohen RoHS-Beschränkungen der Europäischen Union die zukünftige Nutzung von Hg- und Cd-haltigen Bauteilen bei nichtmilitärischen Anwendungen.

ABSTIMMBARE QUANTEN- STRUKTUR-INFRAROT- PHOTODETEKTOREN

Das Fraunhofer IAF ist führend in der Entwicklung der international anerkannten quantenbasierten Alternative zu den markt-

As described by Planck's law, the maximum thermal emission of conventional objects with a surface temperature not higher than a few hundred degrees Celsius occurs in the mid- (MWIR, 3–5 μm) or long-wavelength infrared (LWIR, 8–12 μm), respectively. Moreover, many molecules absorb and emit characteristic radiation in this regime, and their signature in the MWIR or LWIR is comparable to a chemical fingerprint. High-performance detection in the thermal infrared regime is key to a multitude of demanding applications such as passive night vision, remote thermal sensing, environmental monitoring, infrared spectroscopy or space-based applications for earth observation and astronomy. In general, direct photon to electron conversion in semiconductor devices, with a bandgap matching the required long-wavelength detection cut-off, is the operational principle of choice for high-performance IR detectors. Nature offers only two bulk semiconductor materials suitable for detection in the MWIR and LWIR. While the non-variable bandgap of InSb allows solely monochrome detection up to a fixed cut-off wavelength of around 5.6 μm , highly sensitive HgCdTe detectors can cover the entire thermal infrared, but are plagued by low yield and high costs, in particular at longer wavelengths. Furthermore, RoHS restrictions by the European Union threaten the future use of Hg- and Cd-containing components for a wide range of non-military applications.

TUNABLE QUANTUM STRUCTURE INFRARED PHOTODETECTORS

Fraunhofer IAF is instrumental in developing the internationally most acclaimed quantum structure-based alternative to the two mar-

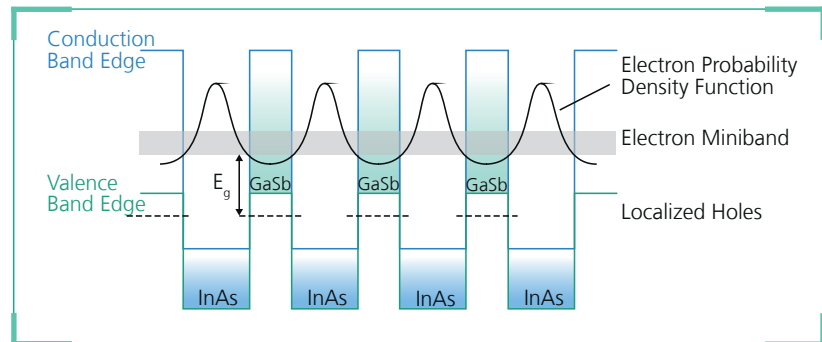


üblichen IR-Detektortechnologien: Übergitter bestehend aus mehreren hundert Abfolgen hauchdünner (üblicherweise 5–15 Monolagen dicker) alternierender Lagen von InAs und GaSb (Abb. 1). Diese formen ein künstliches Bandlückenmaterial, welches es erlaubt, den gesamten thermischen Infrarotbereich von 3 bis 25 μm abzudecken. In einem gut entworfenen Übergitter überlagern sich die elektronischen Wellenfunktionen von angrenzenden InAs-Quantentöpfen und formen somit ein Miniband, welches einen Ladungsträgertransport in der vertikalen Wachstumsrichtung ermöglicht. Es können mono- und bispektrale Infrarot-Focal-Plane-Array (FPA-) Detektoren realisiert werden, welche die Leistungsfähigkeit herkömmlicher Detektortechnologien übertreffen. In Kooperation mit unserem Industriepartner AIM Infrarot-Module GmbH (Heilbronn) werden die Übergitter-Detektor-Arrays des Fraunhofer IAF mit einem Silizium-Auslese-schaltkreis hybridisiert, in einen Stirlingkühler integriert und schließlich zu einem IR-Modul oder sogar zu einer IR-Kamera aufgebaut.

InAs / GaSb ÜBERGITTER- INFRAROTKAMERAS AUF DEM NEUESTEN STAND DER TECHNIK

Jedes Pixel unserer bispektralen Technologie erlaubt die gleichzeitige Detektion eines »blauen« Kanals bei 3–4 μm und eines »roten« Kanals bei 4–5 μm . Diese FPA-Detektoren sind mit ihren 384x288 Pixeln der Kernbestandteil des Flugkörperwarnsystems des Airbus A400M (Abb. 3).

Tatsächlich waren unsere bispektralen Übergitterdetektoren die weltweit ersten, die Teil eines militärischen Ausrüstungsprogramms waren.



ket-dominant technologies shown above. A superlattice comprising several hundreds of periods of very thin (typically 5–15 monolayers; Fig. 1), alternating layers of InAs and GaSb forms an artificial bandgap material that allows coverage of the entire thermal infrared range from 3–25 μm . In contrast to HgCdTe, where the bandgap is determined by the hard-to-control Cd content, the artificial bandgap in InAs/GaSb superlattice quantum structures is determined by the layer thickness of the constituents, which can be controlled with sub-monolayer precision during molecular beam epitaxy of the device. In a properly designed superlattice, the electron wavefunctions of neighboring InAs quantum wells overlap and form a miniband, allowing for carrier transport in the vertical growth direction. Mono- and bispectral IR focal plane array (FPA) detectors can be realized, which surpass the performance of conventional detector technology. In cooperation with our industrial partner AIM Infrarot-Module GmbH in Heilbronn, Germany, Fraunhofer IAF's superlattice detector arrays are hybridized to a silicon readout integrated circuit (ROIC), integrated into a Stirling cooler and assembled into IR modules or even cameras.

1 *Electron wave functions in neighboring InAs quantum wells form a miniband allowing carrier transport. The effective bandgap E_g is controlled by the thickness of the constituent layers.*

3 MIRAS infrared missile approach warning system installed in an Airbus A400M of the German Air Transport Squadron 62.

Die größte Herausforderung stellen LWIR-FPAs dar. Grund dafür ist die benötigte niedrige Bandlücke und die damit einhergehende Fehleranfälligkeit. Aktuell ist das Fraunhofer IAF europaweit die einzige Institution, welche LWIR-Bildgebung mit bereits hoher Leistungsfähigkeit mittels InAs/GaSb-Übergittern demonstrieren konnte. Mit neuartigen Konzepten für Heterostrukturbauelemente, die sich der materialeigenen Designflexibilität zur Dunkelstromunterdrückung bedienen, konnte eine Betriebstemperatur bis 90 K erreicht werden (Abb. 2). Dies ermöglichte die Reduktion von Größe, Gewicht, Leistungsverbrauch und Kosten von LWIR-Kameras mit hoher Leistungsfähigkeit. Unsere Kunden und Projektpartner können von unserer jahrelangen Erfahrung in der Epitaxie und Prozessierung solcher Bauelemente profitieren.

STATE-OF-THE-ART InAs/GaSb SUPER- LATTICE INFRARED CAMERAS

Each pixel of our bispectral technology offers simultaneous detection of a blue channel at 3–4 μm and a red channel at 4–5 μm , respectively. These FPA detectors with 384 \times 288 pixels constitute the core component of the Airbus A400M missile approach warning system (Fig. 3). In fact, our bispectral technology has been the world's first superlattice detector delivered to a high-performance military procurement program.

LWIR FPAs are the most challenging due to the low bandgap required and, as a consequence, their susceptibility to concomitant failure modes. At present, Fraunhofer IAF is Europe's only institution which has demonstrated high-performance LWIR imagers with InAs/GaSb superlattices. Using novel heterostructure device concepts that leverage the inherent design flexibility of the material system for dark current suppression, an operating temperature up to 90 K could be achieved, paving the way for lowering the size, weight, power and costs of high-performance LWIR cameras (Fig. 2). Low operating temperatures make ultra-low dark currents feasible, which in turn makes LWIR superlattice technology particularly promising for space-based earth observation missions.

We offer epitaxy as well as processing services to our customers and project partners based on more than two decades of leading-edge experience.

Robert Rehm

2 In 2018, we managed to demonstrate imaging at 90 K operating temperature with LWIR superlattices.



MORE
INFO



**Fokke Mentjes**

Vice President Mission Systems Combat, Airbus Defence and Space GmbH, Manching

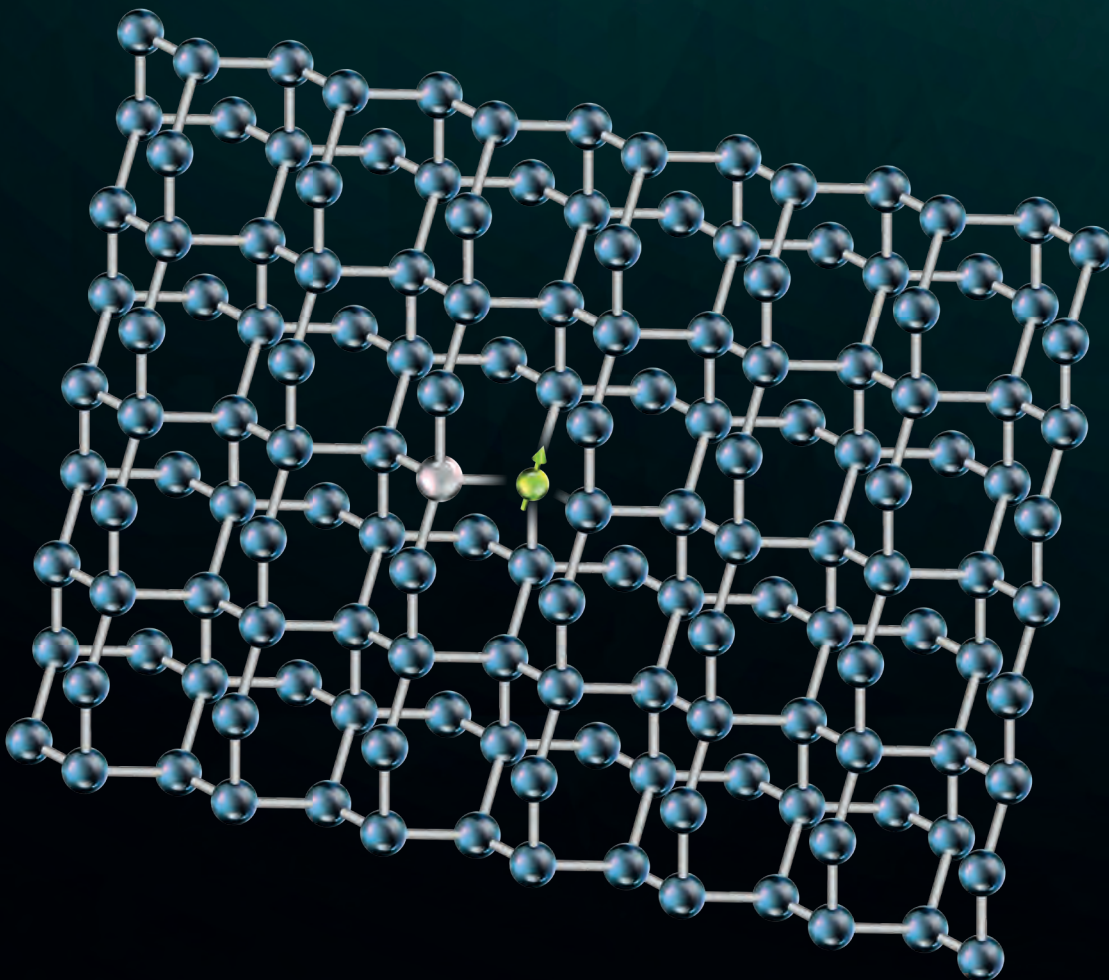
»The advanced dual-color infrared superlattice detectors from Fraunhofer IAF, that are deployed in the MIRAS system of the military transport aircraft A400M, allow us to provide one of the most effective missile approach warning systems for airborne platforms today. With this capability the aircraft can be operated in tactical missions at low altitude in hostile environments.«



PARTNER

QUANTENSENSORIK

Quantum Sensing





Der bildgebende Nachweis kleinster magnetischer Felder mit höchster Ortsauflösung basiert auf der Wechselwirkung der zu messenden Probe mit dem magnetischen Moment eines einzelnen, orientierten Elektrons. Dieses Elektron fungiert als der kleinste mögliche »Tastmagnet«, eingefangen in einer Stickstoff-Kohlenstoff-Fehlstelle fünf Nanometer unter der Oberfläche des umschließenden Diamantkristalls. Bei Raumtemperatur kann mit einer Ortsauflösung von wenigen 10 Nanometern eine Empfindlichkeit von 10^{-10} T/√Hz für den Nachweis magnetischer Felder erreicht werden.

In der schematischen Darstellung befindet sich ein Elektron (kleine grüne Kugel) mit einem orientierten magnetischen Moment (Pfeil) an der Position eines fehlenden Kohlenstoffatoms in einem Diamantkristallgitter (schwarze Kugeln). Das Elektron wurde von dem benachbarten Stickstoffatom (silberne Kugel) in die Fehlstelle abgegeben.

Imaging of smallest magnetic fields with highest spatial resolution is based on the interaction of the sample to be measured with the magnetic moment of an oriented electron. This electron functions as the smallest possible »tactile magnet« captured in a nitrogen-carbon defect five nanometers below the surface of the surrounding diamond crystal. At room temperature, a sensitivity of 10^{-10} T/√HZ can be achieved for the detection of magnetic fields.

The schematic illustration shows an electron (small green sphere) with an oriented magnetic moment (arrow) at the position of a missing carbon atom in a diamond crystal lattice (black spheres). The electron was released into the vacancy by a neighboring nitrogen atom (silver sphere).

LEITPROJEKT ZUR QUANTENMAGNETOMETRIE

Lighthouse Project on Quantum Magnetometry

Im Rahmen der prioritären strategischen Initiative »Quantentechnologie« der Fraunhofer-Gesellschaft hat das Fraunhofer IAF das Leitprojekt »Quantenmagnetometrie« (QMag) gestartet. Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines Rastersondenmikroskops zur Bestimmung winzigster Magnetfelder mit bisher unerreichter räumlicher Auflösung und höchster Sensitivität. Im Schulterschluss mit den Fraunhofer-Instituten IPM, IWM, IMM, IISB und dem Fraunhofer CAP (UK) sollen neuartige, industriell nutzbare Anwendungsfelder erschlossen werden. Damit können zum Beispiel mikro- und nanoelektronische Schaltkreise mit einer nie dagewesenen Auflösung charakterisiert werden, um physikalische Effekte besser zu verstehen, das Design zu optimieren und die Ausbeute zu erhöhen. Durch QMag soll ein Fraunhofer-Leuchtturm im Bereich der Quantentechnologien entstehen, der den Stand der Technik weit übertreffen und künftig international definieren kann.

As part of the Fraunhofer Gesellschaft's Priority Strategic Initiative »Quantum Technology«, IAF has won the lighthouse project »Quantum Magnetometry« (QMag). The aim of this project is to use quantum sensors to determine the smallest magnetic fields with unprecedented spatial resolution and maximum sensitivity. In close cooperation with the Fraunhofer institutes IPM, IWM, IMM, IISB and Fraunhofer CAP (UK), the project will target novel fields of industrial application. This will enable, for example, the characterization of micro- and nanoelectronic circuits with unprecedented resolution to better understand physical effects, optimize design, and increase yield. QMag is intended to create a »Fraunhofer Lighthouse« in the field of quantum technologies that far exceeds the state of the art and can define it internationally in the future.



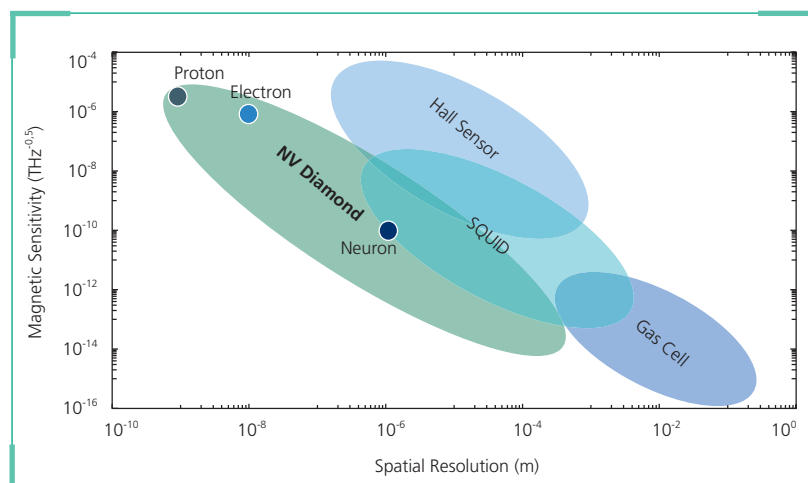
Dr. Ralf Ostendorf
*Head of Business Unit
Semiconductor Lasers
ralf.ostendorf@iaf.fraunhofer.de*

*Ralf Ostendorf wants to
take the next step to bring
optoelectronics into quantum
technology.*

DETEKTION VON MAGNETFELDERN BEI RAUMTEMPERATUR

Magnetfelder treten in Natur und Technik vielfältig auf und werden schon lange intensiv genutzt, sei es das Erdmagnetfeld zur Navigation und für geologische Untersuchungen, sehr fein strukturierte Magnetschichten in Computerfestplatten oder starke Magnetspulen und Permanentmagnete in elektromagnetischen Motoren und Generatoren. Der Nachweis besonders kleiner Magnetfelder mit nanoskaliger Ortsauflösung ist mit den derzeit verfügbaren Magnetometern jedoch nicht möglich. Insbesondere für den bildgebenden Nachweis der Felder, die durch wenige bewegte Elektronen hervorgerufen werden, sind die bestehenden Magnetfeldsensoren bei Raumtemperatur nicht sensitiv genug, um eine hohe Ortsauflösung zu erreichen. Am Fraunhofer IAF werden deshalb Quantensensoren aus Diamant entwickelt, welche eine Detektion von kleinsten Magnetfeldern bei Raumtemperatur ermöglichen und die Magnetometrie auf ein atomares Niveau präzisieren (Abb. 1).

1 *Magnetic sensitivity and spatial resolution of different magnetometer technologies. NV centers achieve the best spatial resolution. Circles provide an indication of the required sensitivity and resolution for the imaging detection of a neuron, electron or proton.*



DETECTION OF MAGNETIC FIELDS AT ROOM TEMPERATURE

Magnetic fields occur in many ways in nature and technology and have long been used intensively, be it the earth's magnetic field for navigation and geological investigations, very finely structured magnetic layers in computer hard disks or strong magnet coils and permanent magnets in electromagnetic motors and generators of modern energy and mobility technologies. However, the detection of particularly small magnetic fields with nanoscale spatial resolution is not possible with currently available magnetometers. Existing magnetic field sensors at room temperature are not sensitive enough to achieve a high spatial resolution, especially for the imaging of fields caused by only a few moving electrons. Fraunhofer IAF is therefore developing quantum sensors made of diamond that enable the detection of the smallest magnetic fields at room temperature and thus bring precision magnetometry to an atomic level (Fig. 1).

IMAGING SCANNING PROBE MAGNETOMETER WITH DIAMOND NV CENTERS

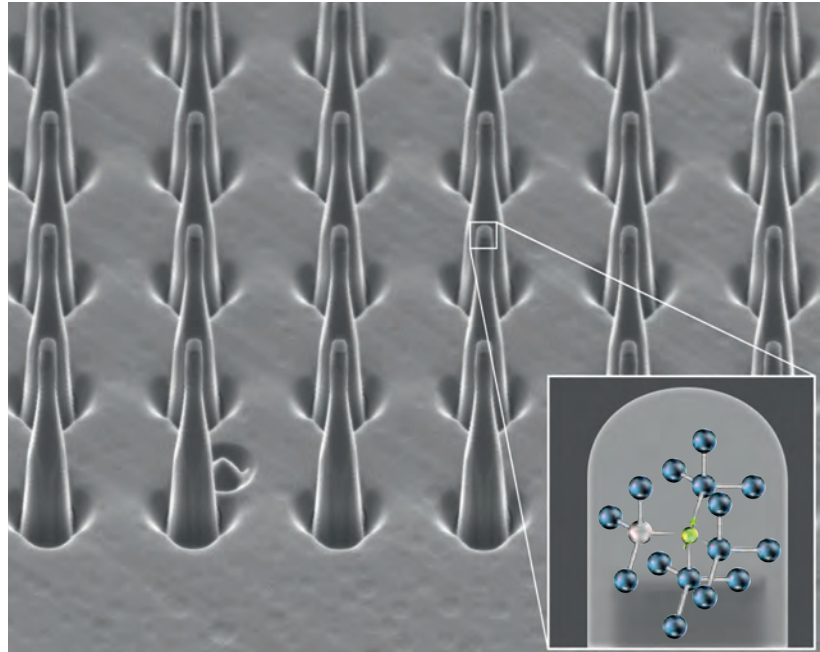
One of the goals at Fraunhofer IAF is to develop an imaging scanning probe magnetometer that can measure magnetic fields with the highest spatial resolution and highest magnetic sensitivity at room temperature. The NV center in diamond is of central importance here: it consists of a crystal defect that can be used as a highly sensitive magnetic field sensor. For this purpose, an NV center is placed



BILDGEBENDES RASTER- SONDEN-MAGNETOMETER MIT DIAMANT-NV- ZENTREN

Eines der Ziele am Fraunhofer IAF ist es, ein bildgebendes Rastersondenmagnetometer zu entwickeln, das Magnetfelder mit höchster räumlicher Auflösung und magnetischer Empfindlichkeit bei Raumtemperatur messen kann. Dabei werden einzelne atomare Zentren als mikroskopische Sonden genutzt. Das NV-Zentrum in Diamant ist dabei von zentraler Bedeutung: Es besteht aus einem Kristalldefekt, welcher als hochempfindlicher Magnetfeld-Sensor genutzt werden kann. Dafür wird ein NV-Zentrum nahe unter der Spitze eines Messkopfs aus Diamant platziert (Abb. 2). Wird diese Sensorspitze in einem Rastersondenmikroskop über eine Probe bewegt, können lokale Magnetfelder mit sehr hoher Genauigkeit abgebildet werden (Abb. 3). Als eine Schlüsselanwendung sollen mithilfe des realisierten Rastersondenmagnetometers kleinste Ströme in nanoelektronischen Schaltungen mit atomarer Auflösung vermessen werden.

Auf dem Weg zur nächsten Generation leistungsfähiger Elektronik ist die Fähigkeit, nanoelektronische Schaltungen mit einer atomaren Auflösung charakterisieren zu können, unabdingbar, denn eine Vielzahl neuer und noch nicht verstandener Phänomene wird dadurch beobachtbar. Die mesoskopische Erfassung von Strömen ist erforderlich, um niederdimensionale Halbleiterbauelemente und Schaltungen zu optimieren, um den Energieverbrauch zu minimieren, Grenzfrequenzen zu erhöhen und neue Materialien schneller nutzen zu können.



close to the tip of a diamond measuring head (Fig. 2). If this sensor tip is integrated into a scanning probe microscope and moved over a sample, local magnetic fields can be imaged with very high accuracy (Fig. 3). As a key application, the scanning probe magnetometer will be used to measure the smallest currents in nanoelectronic circuits with atomic resolution.

On the way to the next generation of high-performance electronics, the ability to characterize nanoelectronic circuits with an atomic resolution is indispensable, because a multitude of new and not yet understood phenomena can be observed. The mesoscopic detection of currents is necessary to optimize low-dimensional semiconductor devices and circuits, to minimize energy consumption, to increase cut-off frequencies and to be able to use new materials faster.

2 Structured single crystalline diamond tips. Inset: Schematic representation of an NV center.

3 The scanning probe microscope to be developed with a diamond tip will be used to characterize nanoelectronic circuits.

STARKE KOOPERATIONEN STRONG COOPERATIONS

Ein herausragendes Alleinstellungsmerkmal von QMag ist die einzigartige Kombination der Kompetenzen der beteiligten Projektpartner. Das Konsortium besteht aus einem Kernteam, das Technologien und Theorien für die Quantensensorik entwickelt (IAF, IPM, IWM). Drei weitere Fraunhofer-Institute (IISB, IMM, CAP) steuern die für die Entwicklung der quantentechnologischen Kernkomponenten erforderliche wissenschaftliche und technologische Expertise bei. Das Konsortium wird ergänzt durch externe akademische Expertise auf dem Gebiet der diamantbasierten Quantentechnologien (Prof. Jörg Wrachtrup, Universität Stuttgart) und der Atomgasmagnetometrie (Universität Freiburg in Kooperation mit Prof. Svenja Knappe, University of Colorado Boulder). Weltweit gibt es keine Forschungsorganisationen, die in vergleichbarer Weise alle relevanten Forschungsgebiete abdecken und die folglich diese Expertise in übergreifender Synergie für die Quantensensorik nutzen könnten.

Das Leitprojekt QMag wird zu gleichen Teilen von der Fraunhofer Gesellschaft und dem Land Baden-Württemberg finanziert.

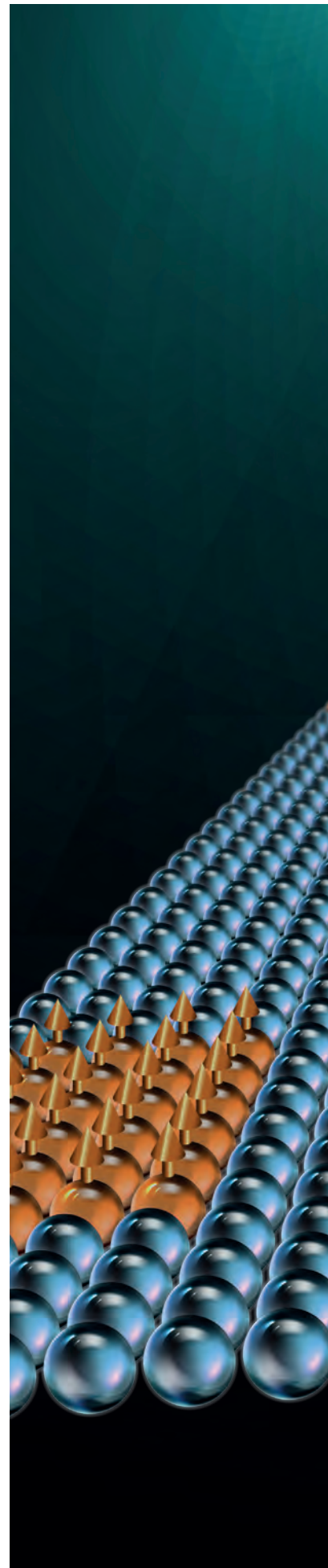
An outstanding characteristic of QMag is the unique combination of the competences of the participating project partners. The consortium consists of a core team that develops technologies and theories for quantum sensors (Fraunhofer IAF, IPM, IWM). Three further Fraunhofer institutes (IISB, IMM, CAP) will contribute the scientific and technological expertise required for the development of the quantum technology core components. The consortium is complemented by external academic expertise in the field of diamond-based quantum technologies (Prof. Jörg Wrachtrup, University of Stuttgart) and atomic gas magnetometry (University of Freiburg in cooperation with Prof. Svenja Knappe, University of Colorado, Boulder). There are no research organisations in the world that cover all relevant research areas in a comparable way and that could consequently use this expertise in synergy for quantum sensor technology.

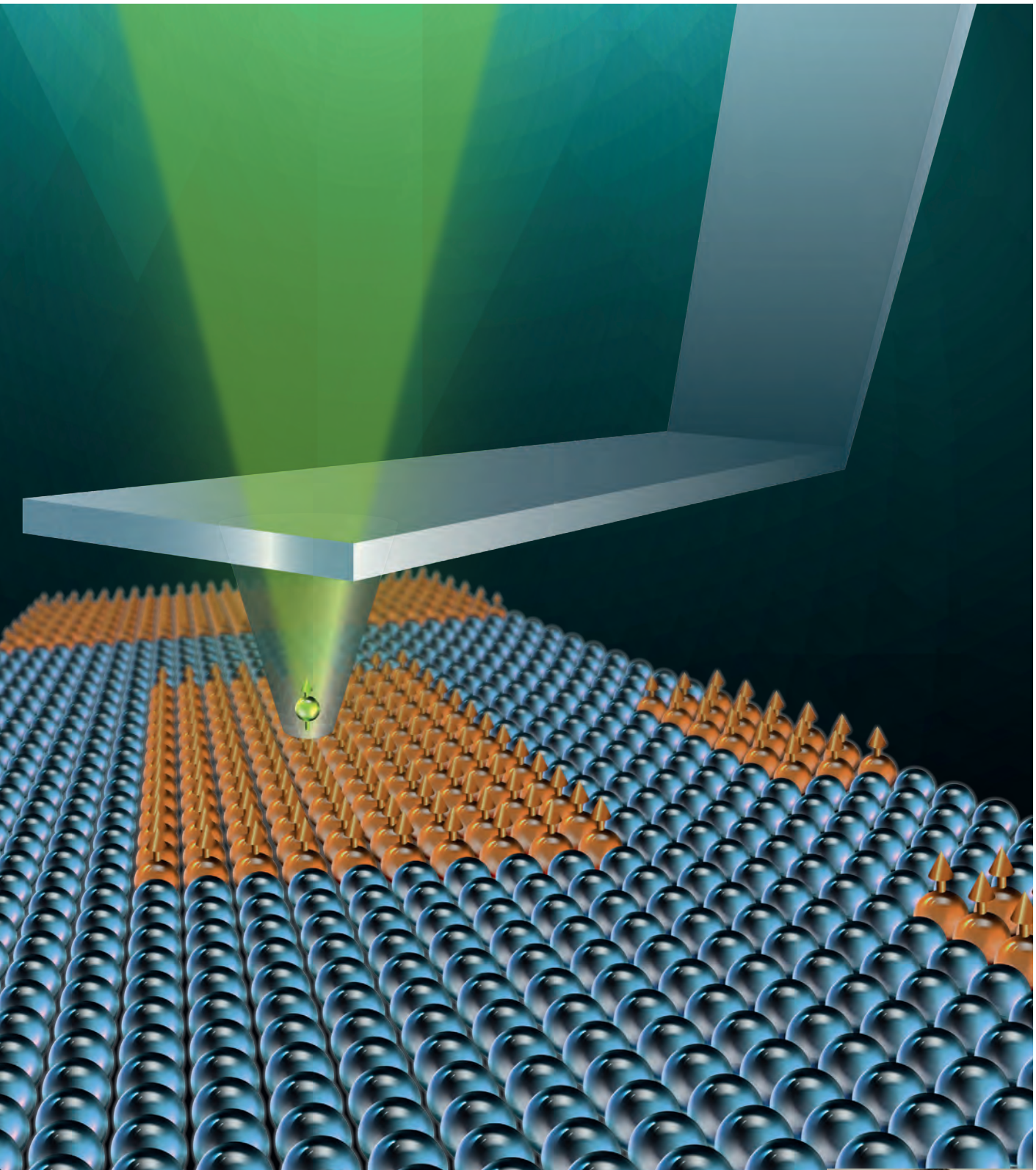
The QMag lighthouse project is financed in equal parts by the Fraunhofer-Gesellschaft and the state of Baden-Württemberg.

Ralf Ostendorf



MORE
INFO



**Prof. Dr. Karsten Buse**

Director of the Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques, Freiburg

»As a complementary approach to IAF, we at IPM will develop an optically pumped alkali magnetometer (OPAM) measurement system with the highest sensitivity for applications in chemical analysis and materials testing. With the innovations in QMag, we will strengthen the perception of both the Fraunhofer-Gesellschaft and the state of Baden-Württemberg in the field of quantum technologies.«



PARTNER

ULTRASENSITIVE LASERSCHWELLEN- MAGNETOMETRIE: QUANTENSENSORIK FÜR MEDIZINANWENDUNGEN

Ultrasensitive Laser Threshold Magnetometry: Quantum Sensors for Medical Applications

Derzeit genutzte hochempfindliche Magnetfeldsensoren, beispielsweise SQUIDs, sind teuer, groß und müssen aufwendig gekühlt werden. Diamant als Lasermedium einzusetzen birgt das Potential, einen neuartigen Magnetfeldsensor mit höchster Sensitivität zu kreieren, um die schwachen Magnetfelder von Gehirn- und Herzaktivität präziser, günstiger und bei Raumtemperatur zu messen. Bei der Laserschwellen-Magnetometrie werden optisch aktive Stickstoff-Vakanz-Zentren in Diamant genutzt. Diese emittieren rotes Laserlicht, welches in seiner Intensität von der Stärke des äußeren Magnetfelds abhängt. Das Konzept hierfür wurde an der RMIT University in Melbourne theoretisch entwickelt. Dank einer »NanoMatFutur«-Förderung des BMBF für das Fraunhofer IAF kann das Konzept in die Anwendung umgesetzt werden und so der medizinischen Diagnostik neue Türen öffnen.

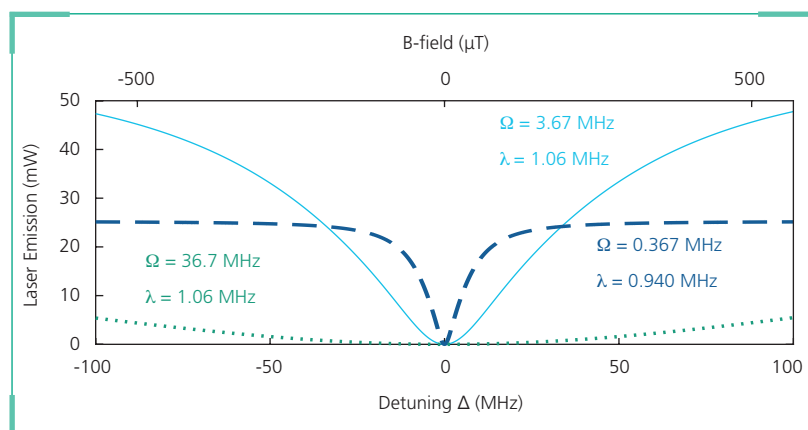
Highly sensitive magnetic field sensors currently in use, such as SQUIDs, are expensive, large and require complex cooling. Using diamond as a laser medium has the potential to create a novel magnetic field sensor with the highest sensitivity to measure the weak magnetic fields of brain and heart activity more precisely, more cheaply and at room temperature. Laser threshold magnetometry uses optically active nitrogen vacancy centers in diamond. These emit red laser light, the intensity of which depends on the strength of the external magnetic field. The concept for this method was theoretically developed at RMIT University in Melbourne. Thanks to a »NanoMatFutur« grant from the German Ministry for Education and Research (BMBF) this concept can now be brought to application at Fraunhofer IAF and can thus open new doors for medical diagnostics.



Dr. Jan Jeske
Group Leader
Quantum Magnetometry
jan.jeske@iaf.fraunhofer.de

Jan Jeske joined IAF in 2018 after 7 years of being a post-doc at RMIT University, Australia, in order to bring his concept of laser threshold magnetometry into application.

1 Theoretical calculations of Laser output power as a function of detuning at the respective operating points. The detuning (bottom axis) and the magnetic field (B field, top axis) can be inferred from the laser output.



Die Messung von Magnetfeldern im menschlichen Körper ist ein wichtiger Teil der medizinischen Diagnostik. Präzise Sensoren messen zum Beispiel die Aktivitäten des Gehirns (MEG) oder Herzens (MKG) und ermöglichen bildgebende Verfahren wie die Magnetresonanztomographie (MRT), um Krankheiten und Defekte zu erkennen. Die meisten Magnetometer besitzen jedoch keine ausreichende Sensitivität, um die schwachen Signale des Gehirns zu messen. Die üblichen hochempfindlichen Magnetfeldsensoren, wie etwa die SQUID-Sensoren (Superconducting Quantum Interference Devices), funktionieren nur bei extremer Kühlung, was ihren Betrieb sehr kostenintensiv und technologisch aufwendig macht. Dampfzellen-Magnetometer oder gezielt eingesetzte Materialdefekte wie Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant können hier eine wichtige Alternative sein. Durch neuartige quantenphysikalische Systeme ergeben sich neue Möglichkeiten für hochempfindliche Sensortechnologien wie das Laserschwelld-Magnetometer, die es ermöglichen könnten, Hirn- und Herzaktivitäten von Ungeborenen zu bestimmen und damit Krankheiten frühzeitig zu entdecken und zu behandeln.

The measurement of magnetic fields in the human body is an important part of medical diagnostics. Precise sensors measure, for example, the activities of the brain (MEG) or heart (MCG) and enable imaging techniques such as magnetic resonance imaging (MRI) to detect diseases and defects. However, most magnetometers do not have sufficient sensitivity to measure the brain's weak signals. Highly sensitive magnetic field sensors currently in use, such as SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices), only function with extreme cooling, which makes their operation very costly and technologically complex. New sensor technologies such as vapor cell magnetometers or diamond with nitrogen vacancy centers (NV centers) can be an important alternative here. New quantum physical systems open up new possibilities for highly sensitive sensor technologies such as the laser threshold magnetometer, which could, for example, make it possible to determine the brain and heart activities of unborn babies and thus detect and treat diseases at an early stage.

HIGHLY SENSITIVE LASER THRESHOLD MAGNETOMETRY USING DIAMOND

NV centers in diamond are quantum systems for applications as sensors at room temperature, for quantum computers or quantum communication. Magnetic fields in particular can be measured precisely and with resolutions in the nanometer range. In NV centers, a nitrogen atom is inserted into a diamond instead of a carbon atom. A second carbon atom in its immediate vicinity is removed. The excess electron of the nitrogen atom falls into

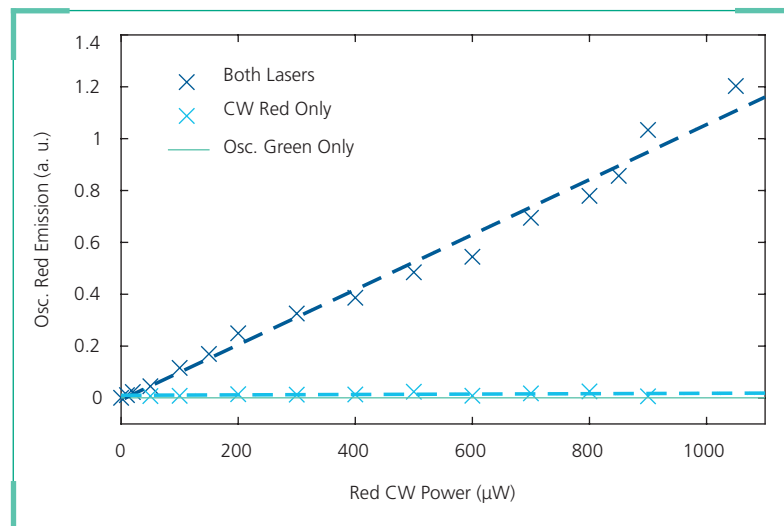


HOCHSENSITIVE LASERSCHWELLEN- MAGNETOMETRIE MIT DIAMANT

NV-Zentren in Diamant sind Quantensysteme, welche bei Raumtemperatur für Anwendungen in Quantenmagnetometern, in Quantencomputern oder in der Quantenkommunikation eingesetzt werden können. Insbesondere magnetische Felder lassen sich präzise und mit Auflösungen im Nanometerbereich durch ihre Nutzung messen. Bei NV-Zentren wird ein Stickstoffatom anstelle eines Kohlenstoffatoms in einen Diamanten eingesetzt und in seiner direkten Nachbarschaft ein weiteres Kohlenstoffatom entfernt. In diese Leerstelle fällt das überschüssige Elektron des Stickstoffatoms hinein und dient so als winziger Messmagnet.

Laserschwellen-Magnetometrie ist ein weltweit neuer Forschungsansatz. Dabei wird die Präzision deutlich erhöht, indem NV-dotierter Diamant als Lasermedium eingesetzt wird (Abb. 3). Die durch das Magnetfeld verursachte Variation der NV-Helligkeit wird durch die Laserkavität verstärkt. Durch den Wettbewerb von spontaner und stimulierter Emission und den Betrieb nahe an der Laserschwelle werden eine wesentlich höhere Signalstärke und bessere Kontrastwerte erreicht (Abb. 1). Theoretische Rechnungen zeigen, dass dies die erreichbare quantenlimitierte Sensitivität in den Bereich der besten Magnetometer ($\text{fT}\sqrt{\text{Hz}}$) bringt. Erste experimentelle Messungen von stimulierter Emission von NV-Zentren (Abb. 2) bilden eine vielversprechende Grundlage für die Umsetzung eines NV-Lasers.

Durch die Synergie der drei Kernkompetenzen des Fraunhofer IAF, bestehend aus Diamantwachstum, Optoelektronik bzw.



this void and serves as a tiny measuring magnet.

Laser threshold magnetometry is a completely new research approach. The measurement precision is significantly increased by using NV-doped diamond as a laser medium (Fig. 3). The variation in laser brightness caused by the magnetic field is amplified by the laser cavity. The competition of spontaneous and stimulated emission and the operation close to the laser threshold achieves much higher signal strength and contrast (Fig. 1). Theoretical calculations show that this brings the achievable quantum-limited sensitivity into the range of the best magnetometers ($\text{fT}\sqrt{\text{Hz}}$). First experimental measurements of stimulated emission from NV centers (Fig. 2) give a promising outlook for the realisation of an NV Laser.

The synergy of the three core competences of Fraunhofer IAF, consisting of diamond growth, optoelectronics (semiconductor lasers) and high-frequency electronics, will help quantum magnetometry to be transferred very quickly into applied systems. The aim of the first project phase is to better ana-

2 First direct measurement of stimulated emission from NV centers using a lock-in technique. The stimulated emission is emitted in the laser beam direction and is thus entirely collected by the detector and gives a clear signal linear with stimulating power. The dashed lines are linear fits.

3 In the new concept of laser threshold magnetometry a diamond doped with NV centers (atomic structure inset) is used as a laser medium. Green light pumps the NV centers and their red emission creates the laser output. An RF antenna allows the magnetic field dependent manipulation of the NV center's spin state, which directly changes the brightness of the laser output.

Halbleiterlaser und Hochfrequenzelektronik, soll die Quantenmagnetometrie sehr schnell in angewandte Systeme überführt werden. Das Ziel besteht darin, die Materialeigenschaften von hoch NV-dotiertem Diamant präziser zu analysieren und weiter zu verbessern, um optimierte Laserkristalle zu erzeugen und Laserswellen-Magnetometrie entwickeln zu können. Unterstützt wird dies durch eine Industriekooperation mit der SIGMA Medizin-Technik GmbH, die die technische Ausstattung für erste biologische Vergleichsmessungen zur Verfügung stellt. Biomagnetismus-Experten von den Universitätskliniken Freiburg und Heidelberg werden diese Messungen begleiten. Das BMBF fördert das auf fünf Jahre angelegte Projekt »DiLaMag« im Rahmen des Nachwuchswettbewerbs »NanoMatFutur« (FKZ: 13XP5063).

lyze and improve the material properties of highly NV-doped diamond in order to generate optimized laser crystals and develop the first demonstrators of the laser threshold magnetometer. The second phase of the project focuses on further improving the sensitivity. The project is supported by an industrial cooperation with SIGMA Medizin-Technik GmbH, which provides the technical equipment for the first biological comparison measurements. Biomagnetism experts from the University Hospitals of Freiburg and Heidelberg will accompany these measurements.

The German Ministry for Research and Education (BMBF) is funding the five-year »DiLaMag« project as part of the »NanoMatFutur« competition for young researchers (grant agreement no.: 13XP5063).

Jan Jeske



MORE
INFO



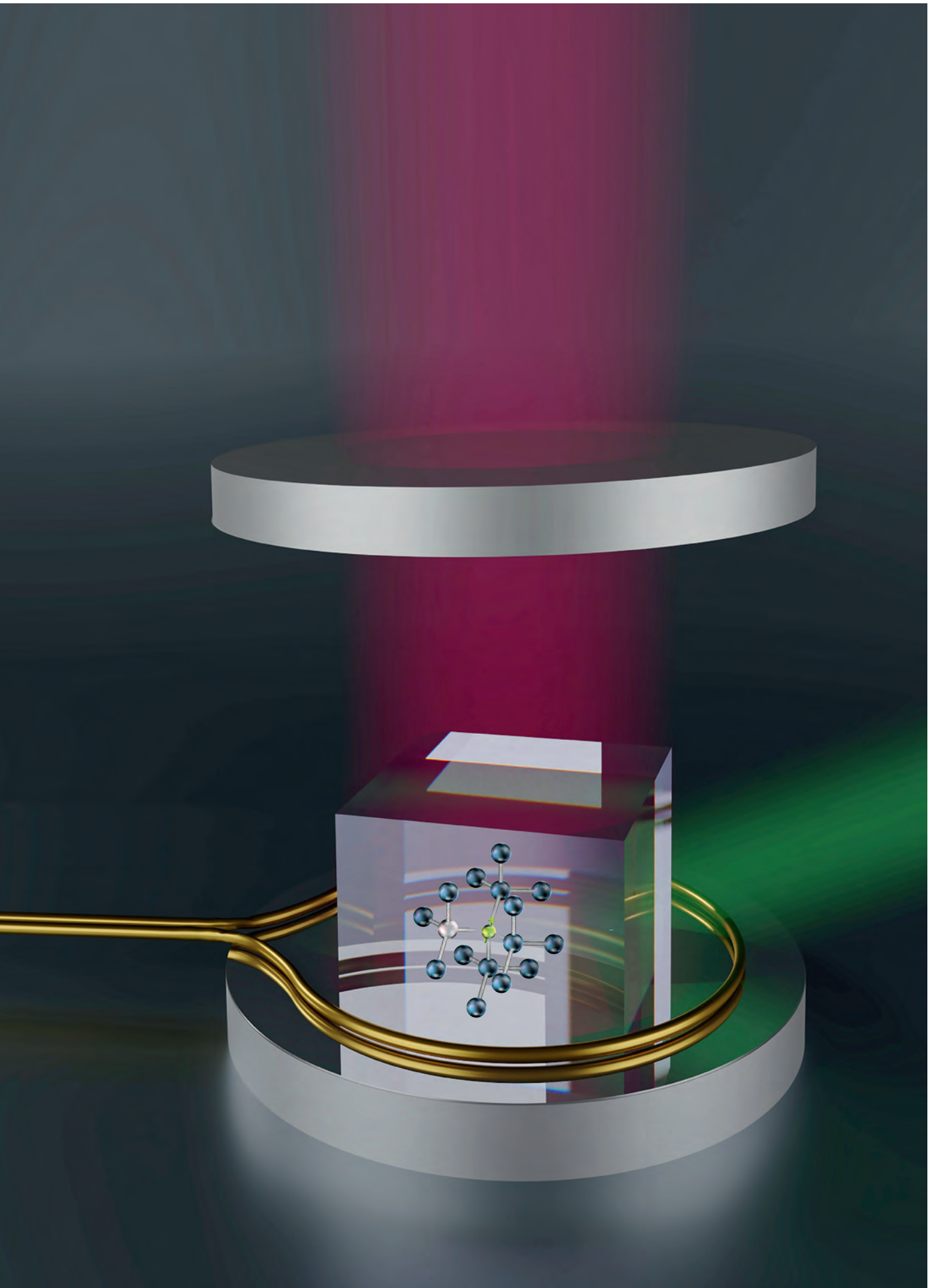
PARTNER



Jochen Schwind

Founder of SIGMA Medizin-Technik GmbH, Gelenau

»Brain imaging via MEG techniques are rare due to the difficult and expensive sensor technology. Novel ultraprecise magnetometers which operate at room temperature can enable a new generation of MEG and other medical technologies, making health care more affordable, versatile and precise.«



QUANTENSENSOREN AUS DIAMANT FÜR DIE MEDIZINTECHNIK

Diamond Quantum Sensors for Medical Technology

Kardiovaskuläre Krankheiten sind die häufigste Todesursache weltweit, dicht gefolgt von Krebserkrankungen. Zur Diagnose und Therapiebewertung werden derzeit verschiedene bildgebende Verfahren eingesetzt. Für Patienten besonders schonend und dabei effizient ist die Magnetresonanztomographie (MRT), da sie ohne schädliche Chemikalien oder radioaktive Substanzen auskommt und dreidimensionale, detailreiche Schnittbilder von menschlichem Gewebe liefert. Das Fraunhofer IAF arbeitet mit nationalen und internationalen Partnern zusammen, um einen Polarisator aus NV-dotierten Diamantschichten zu entwickeln, welcher die Effizienz der MRT-Methode signifikant steigern kann. Das Ziel liegt darin, bei Raumtemperatur eine 160-fach höhere Effizienz sowie eine 40-fach schnellere und 4-fach kostengünstigere Polarisation von Kernspins als bisher zu erreichen. So kann es möglich werden, Krebs nicht nur frühzeitig zu diagnostizieren, sondern zudem die Biochemie von Metastasen besser zu verstehen.

Cardiovascular diseases are the most common cause of death worldwide, closely followed by cancer. Various imaging methods are currently being used for diagnosis and therapy evaluation. Magnetic resonance imaging (MRI) is particularly gentle and efficient for patients because it does not require harmful chemicals or radioactive substances and provides three-dimensional, detailed sectional images of human tissue. Fraunhofer IAF is collaborating with national and international partners to develop a polarizer made of NV-doped diamond layers to significantly increase the efficiency of the MRI method. The aim is to achieve 160 times higher efficiency at room temperature as well as 40 times faster and 4 times cheaper polarization of nuclear spins than before. This will make it possible not only to diagnose cancer early but also to better understand the biochemistry of metastases.



Dr. Christoph Nebel
Head of Business Unit
Diamond Devices
christoph.nebel@iaf.fraunhofer.de

Christoph Nebel coordinates the project »MetaboliQs«, which has the goal of developing an innovative diamond polarizer.

Schon heute ermöglicht die Magnetresonanztomographie (MRT) eine erstaunlich genaue Darstellung der inneren Organe ohne Strahlenbelastung. Sie bildet die magnetischen Momente der Kernspins der Wassermoleküle des Körpers ab und zeigt so die Struktur und Funktion der Gewebe und Organe. Dank der Quantentechnologie lässt sich zukünftig der Rückgang an Metastasen, der etwa den Erfolg einer Krebstherapie anzeigt, detailliert verfolgen und quantifizieren. Diese Weiterentwicklung, bei der synthetische Diamantplättchen eine wichtige Rolle spielen, ist für Diagnostik und Medikamentenentwicklung gleichermaßen interessant.

HYPERPOLARISATION MITTELS DIAMANT

Die Stärke des MRT-Signals wird durch die Polarisation von Kernspins der Biomarker im Körper bestimmt, welche wiederum durch hochleistungsfähige Magnete in Kombination mit Scannern erreicht wird. Bislang dauert der Hyperpolarisierungsprozess lange (90 – 180 Minuten pro Verfahren), ist extrem kostspielig (> 2 Millionen Dollar Anschaffungskosten für Anlagen in der Größe eines ganzen Raumes) und erfordert zudem Temperaturen von unter -270 Grad Celsius. Forscher des Fraunhofer IAF und der Ulmer Firma NVision entwickeln mit weiteren nationalen und internationalen Partnern Diamantplättchen, die dicht unter ihrer Oberfläche eine hohe Anzahl von Stickstoff-Kohlenstoff-Fehlstellen aufweisen. Mittels Laserlicht werden die magnetischen Momente der Elektronen dieses Zentrums ausgerichtet. Bringt man Biomarkermoleküle, wie Pyruvate, die einen Kernspin tragen, an die Oberfläche

Even today, magnetic resonance imaging (MRI) enables an amazingly accurate representation of the internal organs without exposure to radiation. It depicts the magnetic moments of the nuclear spin of the body's water molecules and thus shows the structure and function of the body's tissues and organs. Thanks to quantum technology, it will in future be possible to monitor and quantify in detail the reduction in metastases, which, for example, indicates the success of cancer therapy. This development, in which synthetic diamond plates play an important role, is equally interesting for diagnostics and drug development.

HYPERPOLARIZATION WITH DIAMOND

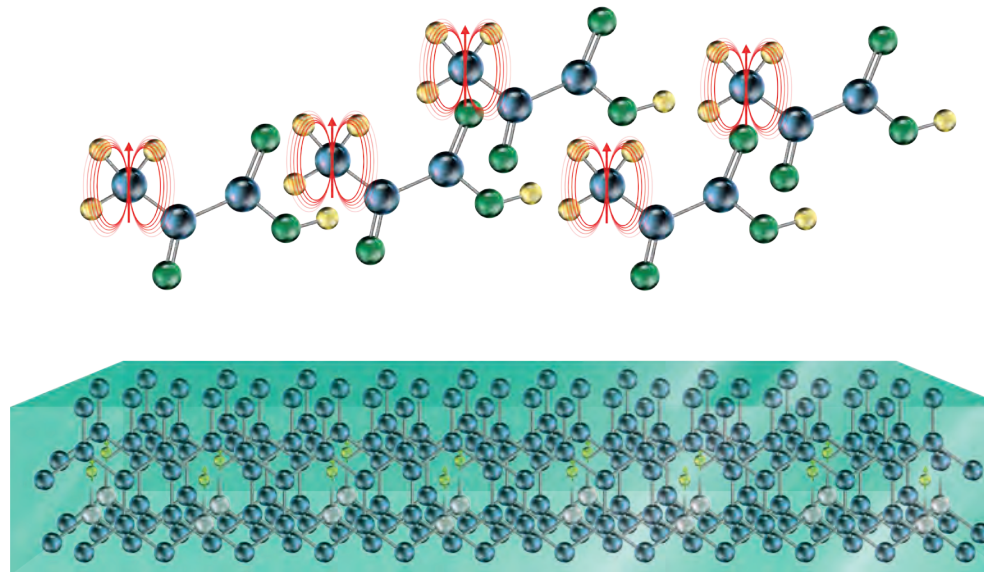
The strength of the MRI signal is determined by the polarization of the biomarker's nuclear spins in the body, which in turn is achieved by high-performance magnets in combination with scanners. Unfortunately, the hyperpolarization process today takes a long time (90–180 minutes per procedure), is extremely costly (> \$ 2 million acquisition costs for equipment the size of an entire room), and also requires temperatures below -270 degrees Celsius. For this reason, researchers from Fraunhofer IAF and the Ulm-based company NVision are working with other national and international partners to develop diamond plates that have a high number of nitrogen defects just below their surface in which electrons are trapped. Laser light is used to align the magnetic moments of the electrons. When biomarker molecules such as pyruvate carrying a nuclear spin are



des Diamantplättchens, führt die magnetische Wechselwirkung zwischen den magnetischen Momenten der Elektronen im Diamant und denen der Kernspins im Pyruvat dazu, dass sich der Kernspin der Moleküle im Pyruvat in gleicher Weise orientiert. Werden diese Moleküle einem Patienten verabreicht, akkumulieren sie in schnell wachsenden Krebszellen und Metastasen, was sie für den Kernspintomographen besonders sichtbar macht. Schon in geringen Konzentrationen und somit hoher Ortsauflösung können sie nachgewiesen werden. Gefährliche Zellen können so frühzeitig erkannt und die Heilungschancen stark erhöht werden.

PERFEKTIONIERUNG DES DIAMANT-NV-WACHSTUMS AM IAF

Da die Polarisation des Biomarkermoleküls erst dann stattfindet, wenn es sich in der Nähe der NV-dotierten Diamantoberfläche befindet, konzentriert sich das Fraunhofer IAF auf die Perfektionierung dieser Oberfläche. Die Dotierung von Diamantschichten mit hoher Stickstoffkonzentration gilt als die optimale Methode für die Herstellung von NV-Zentren. Die Stickstoff-Aktivierung erfolgt dabei durch die Bestrahlung der am Fraunhofer IAF gewachsenen Diamantschichten mit Helium-Atomen, um Vakanzen zu bilden, die wiederum NV-Zentren formen. Um große Mengen an Biomarkermolekülen zu polarisieren wird eine große Oberfläche des Diamants für den Spin-Transfer benötigt.



brought close to the surface of the diamond plate, the magnetic interaction between the magnetic moments of the electrons and those of the nuclear spins of the pyruvate causes the nuclear spins of all molecules to orient themselves in the same way. When these molecules are administered to a patient, they accumulate in fast-growing cancer cells and metastases. This makes them particularly visible to magnetic resonance tomography and they can be detected even in low concentrations and with high spatial resolution.

PERFECTION OF DIAMOND NV GROWTH AT IAF

Since the polarization of the biomarker molecule only takes place when it is close to the NV-doped diamond surface, Fraunhofer IAF is

1 Schematic of a hyperpolarization plate made of NV-doped diamond. During hyperpolarization, nuclear spins of molecules are aligned.

2 The diamond polarizer developed with our partners can achieve 160 times higher efficiency and 40 times faster polarization at room temperature.

Das am IAF entwickelte Überwachsen von 3D-Oberflächenstrukturen führt zu Oberflächen mit hoher Kristallqualität und entsprechend langen Kohärenzzeiten. Die Arbeit an den NV-Zentren ist Bestandteil des Projekts »MetaboliQs«, welches als Teil des »FET Flagship on Quantum Technologies« der EU unterstützt wird (FKZ: 820374).

concentrating on perfecting this surface. The growth of diamond layers with a high nitrogen concentration is considered to be the optimal method for the production of nitrogen centers in diamond. NV activation is achieved by irradiating the diamond grown at IAF with helium atoms. In order to polarize large quantities of biomarker molecules, a large surface of the diamond is required for the spin transfer. The overgrowth of 3D surface structures with a high aspect ratio developed at IAF leads to surfaces with high crystal quality and correspondingly longer coherence times. This work is part of the project »MetaboliQs«, which is being supported as part of the EU's »FET Flagship on Quantum Technologies« (grant agreement no.: 820374).

Christoph Nebel



MORE
INFO



PARTNER



Sella Brosh

CEO of NVision Imaging Technologies GmbH, Ulm

»IAF's deep knowledge and expertise in nano-fabrication and growth of diamonds is invaluable. But beyond that, as a start-up, we feel fortunate to be collaborating with a team whom we trust and enjoy working with, one that shares the excitement for diamond quantum technologies.«



DIAMANT-EPITAXIE AUF WAFEREBENE FÜR QUANTENBAUELEMENTE

Wafer-Scale Diamond Epitaxy for Quantum Devices

Heteroepitaktisch gewachsene Diamantfilme haben in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erhalten. Die überlegenen physikalischen Eigenschaften von Diamant machen ihn zu einem gefragten Material für eine Vielzahl von High-tech-Anwendungen, einschließlich Höchsthfrequenz- und Leistungselektronik, integrierter optischer Schaltkreise und aufkommender Bauelemente für die Quanteninformationsverarbeitung. Die letztere Anwendung stellt die größten Anforderungen an die Kristallqualität, Kristallinität, Reinheit und Defektdichte der funktionellen Diamantschichten. Das Fraunhofer IAF konzentriert sich derzeit auf die Herstellung von Diamantfilmen mit hoher Kristallqualität sowie freistehenden Wafern. In Kooperation mit Fraunhofer-Partnerinstituten entwickelt das IAF Depositions- und Prozessierungstechnologien, die eine Plattform für die industrielle Herstellung von Diamantbauteilen mit erweiterten Funktionalitäten und höchster Zuverlässigkeit ermöglichen.

Heteroepitaxial diamond films have recently attracted much attention. The superior physical properties of diamond are interesting for a variety of high-tech applications, including ultra-high frequency and power electronics, integrated optical circuits and emerging quantum information processing devices. The latter application is the most demanding on the crystal quality, posing exceptionally high requirements on the crystallinity, purity and defect density of the functional diamond layers. Fraunhofer IAF currently focusses on wafer-scale fabrication of high crystal quality diamond films and free-standing wafers. In cooperation with partner Fraunhofer institutes, IAF develops deposition and processing technologies which will enable the platform for large-scale industrial fabrication of diamond devices with extended functionalities and ultimate reliability.



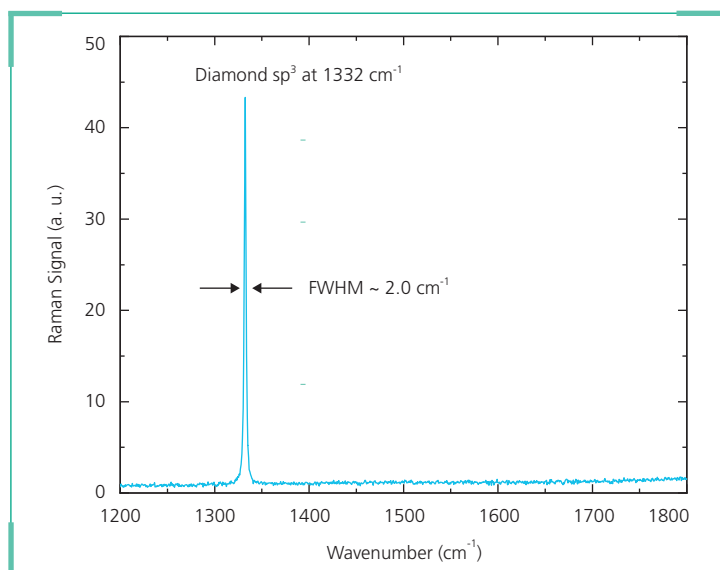
Dr. Vadim Lebedev
Group Leader
Diamond Heteroepitaxy
vadim.lebedev@iaf.fraunhofer.de

In 2018, Vadim Lebedev was able to scale the growth of monocrystalline diamond to 2 inches, taking a step towards industrial-scale wafer production.

ENTWICKLUNG VON DIAMANT-WAFERN

Ähnlich wie bei anderen Halbleitern mit großer Bandlücke ist das Haupthindernis für eine schnelle Entwicklung von Diamantbauelementen das Fehlen von kompatibelem Substratmaterial. Synthetische Diamantsubstrate, die durch die Kristallisation von Kohlenstoff bei hoher Temperatur und unter hohem Druck (HTHP) hergestellt werden, liefern die erforderliche Kristallqualität, sind jedoch in der Größe begrenzt (maximal $10 \times 10 \text{ mm}^2$). Um größere Abscheidungsgebiete zu erreichen, werden heteroepitaktische Diamantschichten typischerweise auf fremden Substraten nukleiert und gewachsen. Gegenwärtig verwendet das Fraunhofer IAF dünne Schichten von einkristallinem Iridium auf Siliziumwafern mit 50 mm Durchmesser als epitaktisches Substrat für eine Bias-verstärkte Nukleation (BEN) von gut orientierten Diamantclustern. Freistehende, heteroepitaktische Diamantwafer, die am Fraunhofer IAF mit der ELO-Technik gewachsen wurden,

1 Raman spectrum taken on a $200 \mu\text{m}$ thick, free-standing heteroepitaxial diamond wafer showing a full width at half maximum (FWHM) of 2.0 cm^{-1} .



DIAMOND WAFER DEVELOPMENT

Similar to other wide bandgap semiconductors, the main obstacle hindering a rapid evolution of diamond devices is the lack of a compatible substrate material. Synthetic diamond substrates fabricated by crystallization of carbon at high temperature and under high pressure (HTHP) provide the required crystal quality, but are limited in size (max. $10 \times 10 \text{ mm}^2$). In order to achieve larger deposition areas, heteroepitaxial diamond layers are typically nucleated and grown on foreign substrates. Currently, Fraunhofer IAF employs thin layers of single-crystalline iridium on 50 mm silicon substrates as an epitaxial template for a bias-enhanced nucleation (BEN) of well-oriented diamond clusters. Free-standing, heteroepitaxial diamond wafers grown at Fraunhofer IAF using epitaxial lateral overgrowth demonstrate a full width at half maximum (FWHM) of the diamond Raman peak (sp^3 peak at 1332 cm^{-1} ; Fig. 1) of $\sim 2.0 \text{ cm}^{-1}$, which matches the properties of HTHP material.

DIAMOND FOR QUANTUM DEVICES

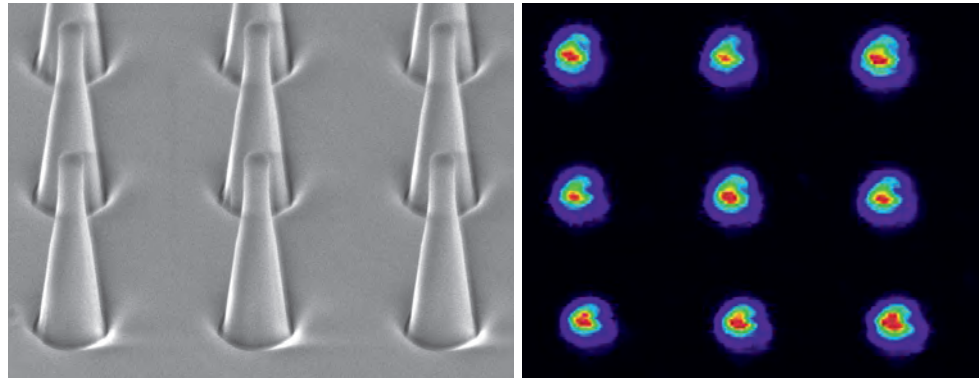
One of the most spectacular properties of diamond is the ability to form vacancy-linked color centres (e.g. a negatively charged nitrogen vacancy complex, NV⁻), which exhibit an enormous potential for quantum information processing (QIP) devices. Unlike conventional QIP transducers operating at cryogenic temperatures, Cr-V, N-V, and Si-V complexes in diamond demonstrate a narrow luminescence band, a short excited-state lifetime, and



zeigen eine Halbwertsbreite (FWHM) des Diamant-Raman-Peaks (sp^3 -Peak bei 1332 cm^{-1} ; Abb. 1) von $\sim 2,0\text{ cm}^{-1}$, was den Eigenschaften von HTHP-Material entspricht.

DIAMANT FÜR QUANTENBAUELEMENTE

Eine der spektakulärsten Eigenschaften von Diamant ist die Fähigkeit, leerstellengebundene Farbzentren zu bilden (z.B. ein negativ geladener Stickstoff-Leerstellen-Komplex, NV), die ein enormes Potential für Quanteninformationsverarbeitungs- (QIP) Bauelemente aufweisen. Die Technologien, die vom Fraunhofer IAF und unseren Partnern entwickelt wurden, ermöglichen eine kontrollierte Bildung der Zentren in epitaktischen Diamantschichten entweder durch Ionenimplantation mit einer Präzision im Nanometerbereich oder durch In-situ-Dotierung. Kürzlich konnten Forscher am IAF Arrays von Diamant-Nanoemittern mit einem Durchmesser von 60 bis 200 nm und einer Länge von $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ herstellen (Abb. 2). Diese Diamantsäulen werden auf HPHT-Substraten mittels Elektronenstrahl-Lithographie und Sauerstoff-Plasma-Trockenätzen hergestellt. Jeder Emitter enthält ein implantiertes einzelnes NV-Zentrum, das eine effiziente photostimulierte Lumineszenz zusammen mit einer Einzelphotonenemission bei Raumtemperatur aufweist. Die am IAF erreichte Entwicklung in der CVD-Synthese ermöglicht Diamantschichten mit einem sehr hohen Grad an Perfektion, durch die der Elektronenspin der Leerstellenkomplexe sehr lange Dekohärenzzeiten von mehr als 1 ms aufweist. In diesen Filmen können Spins einzelner Atome und Elektronen leicht isoliert, initialisiert, manipuliert und mit optischen Techniken ausgelesen



a single photon emission at 300 K. Technologies developed by Fraunhofer IAF and our partners allow for a controlled formation of the centers in epitaxial diamond layers either via ion implantation with a nanoscale precision or using in-situ doping, e.g. for nanoscale magnetic resonance sensors. Recently, researchers at IAF were able to fabricate arrays of diamond nanoemitters with diameters ranging from 60 to 200 nm and lengths of $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ (Fig. 2). These diamond pillars are manufactured on HPHT substrates using electron beam lithography and oxygen-plasma dry etching. Each emitter contains an implanted single NV center demonstrating an efficient photo-stimulated luminescence along with a single-photon emission at room temperature. Substantial development in CVD synthesis allows the creation of diamond films with a very high degree of perfection, such that the electron spin of the vacancy complexes exhibit a very long decoherence time in excess of 1 ms. In these films, spins of single atoms and electrons associated with these complexes can be easily isolated, initialized, manipulated and read out using optical techniques. This paves the way for miniaturized magnetometric devices operating at room temperature, e.g. for nanoscale magnetic resonance ima-

2 Left: Electron microscopy image of an array of $\varnothing 200\text{ nm}$ diamond pillars. Each pillar contains an implanted single NV center. Right: Micro-photoluminescence map showing the existence of NV centers.

3 *Free-standing unpolished diamond wafers manufactured using bias-enhanced nucleation and chemical vapor deposition on Ir(001) templates.*

werden. Dies ebnet den Weg für miniaturisierte magnetometrische Bauelemente bei Raumtemperatur, z.B. für nanoskalige magnetische Bildgebungsanwendungen, die am IAF intensiv erforscht werden (siehe die vorherigen Artikel in diesem Jahresbericht).

Um eine reibungslose Übertragung der Technologien zur Herstellung von Bauelementen von der Homoepitaxie auf die Heteroepitaxie auf Wafer Ebene zu gewährleisten, wird nun die Kristallqualität und die Homogenität der Diamantwafer weiter verbessert (Abb. 3). In den kommenden fünf Jahren wird eine schrittweise Skalierung des Waferdurchmessers von derzeit 50 mm auf fertigungsrelevante 100 mm und größer erwartet. Dieser wirklich ambitionierte Schritt erfordert radikale Veränderungen an den Reaktoren. Daher entwickelt das IAF derzeit zusammen mit Geräteherstellern das Design von CVD-Reaktoren der nächsten Generation, die in der Lage sind, großflächige einkristalline Diamantwafer zu nukleieren und zu wachsen.

ging (MRI) applications, which are under intensive development at IAF (see the preceding articles in this annual report).

To ensure a smooth migration of the device fabrication technologies from homoepitaxy towards the wafer-scale heteroepitaxial platform, IAF researchers now focus their efforts on substantially improving the crystalline quality and uniformity of the diamond wafers. Gradual scaling-up of the wafer diameter from 50 mm currently towards manufacturing-relevant 100 mm and larger is expected within the next five years. This truly ambitious step requires radical changes to be made to the growth equipment. Therefore, the design of next-generation CVD reactors capable of nucleating and growing large-scale single-crystalline diamond wafers is currently being developed by Fraunhofer IAF in cooperation with equipment manufacturers.

Vadim Lebedev



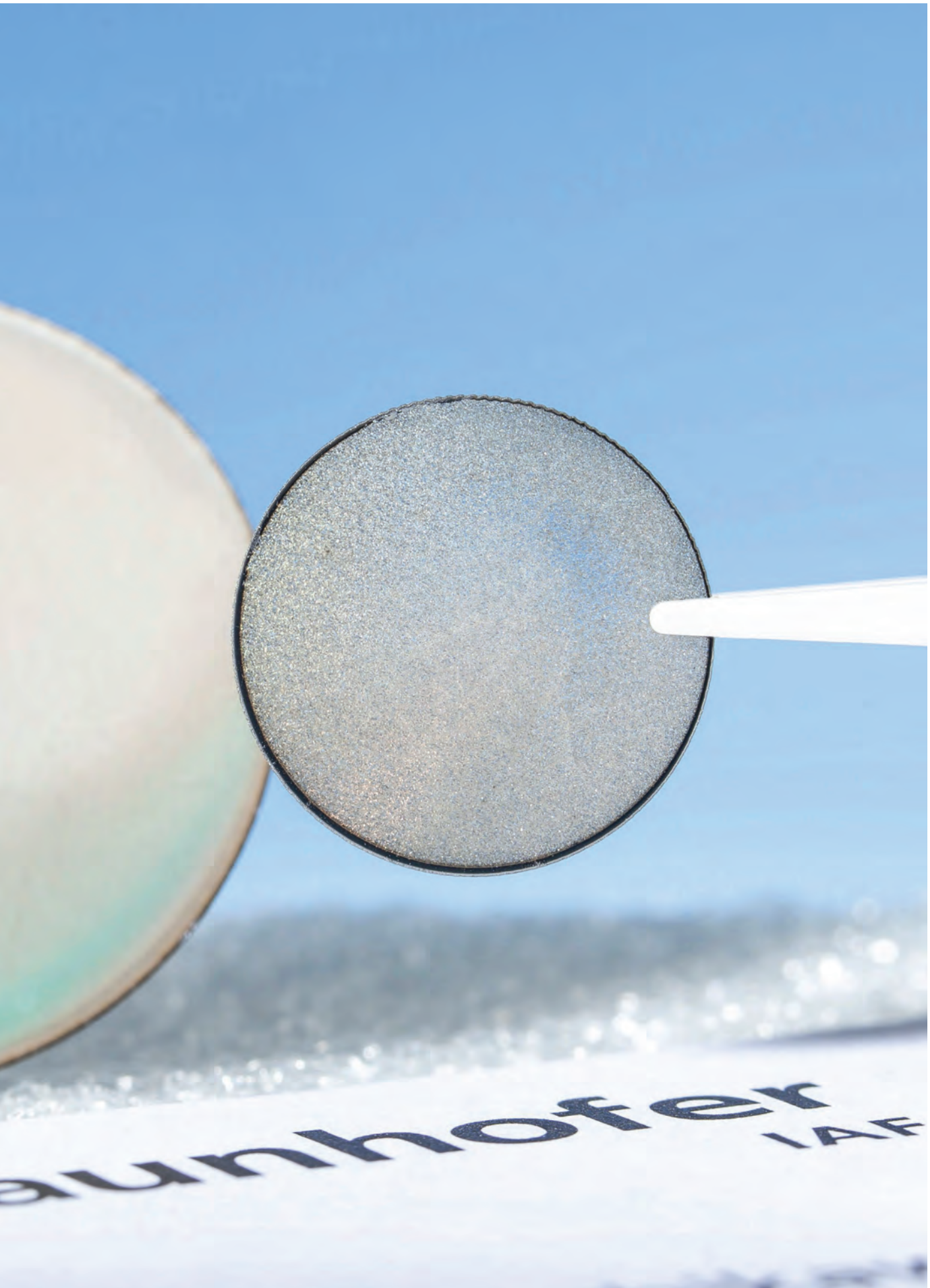
**MORE
INFO**



Ralf Eichert

Managing Director / Vice President of Evatec Europe GmbH, Aschheim Dornach

»Evatec is a leader in thin film technology production solutions for the semiconductor, optoelectronics, photonics and advanced packaging industries. The industrially relevant Fraunhofer IAF developments in diamond technology enable us to implement new market opportunities in the areas of MEMS, wireless communication and power devices«.



QUANTENSPRUNG IST FÜR MICH ...

Quantum Leap Means for Me ...

$$\Delta x \Delta p \geq h$$



»... when you take action on your passion, brave enough to leave the comfort zone«.

Anli Ding is writing her doctoral dissertation on AlScN surface acoustic wave resonators at Fraunhofer IAF.

WO SICH WISSENSCHAFTLER MAL IRRTEN ...

When Scientists Were Wrong ...



»Es gibt nichts Neues mehr. Alles, was man erfinden kann, ist schon erfunden worden.«

1899: Charles Holland Duell, US-amerikanischer Jurist und Patent-Kommissar

»Jeder, der in der Umwandlung der Atome eine neue Energiequelle sucht, spricht kompletten Unsinn!«

1881 – 1937: Ernest Rutherford, neuseeländischer Atomphysiker

»Es scheint, dass wir die Grenzen dessen erreicht haben, was mit Computertechnologie möglich ist.«

1949: John von Neumann, ungarisch-US-amerikanischer Mathematiker

»Diese Strahlen des Herrn Röntgen werden sich als Betrug herausstellen.«

1895: William Thomson / Lord Kelvin, britischer Physiker der Elektrizitätslehre und Thermodynamik

»Mit der Weltausstellung von Paris wird auch die Geschichte des elektrischen Lichts enden, und man wird nicht mehr davon hören.«

1878: Erasmus Wilson, englischer Professor an der Oxford University

»Radiowellen können den Atlantik nicht überqueren.«

1901: Henri Poincaré, französischer Mathematiker, Physiker, Astronom und Philosoph

Quelle: Das Automobil ist nur eine vorübergehende Erscheinung: Kuriose Prognosen, die knapp danebengingen (riva Taschenbuch, 7. März 2016)



WORIN SICH WISSENSCHAFTLER VIELLEICHT AUCH NOCH IRREN KÖNNTEN...

What Scientists May Also Be Wrong About ...



»Quantencomputer werden in unserem alltäglichen Leben keine Rolle spielen. Sie machen zu viele Fehler.«

»Die Energieeffizienz von Hochleistungs-Computern kann nicht wesentlich verbessert werden.«

»Quantenkaskadenlaser werden für technische Anwendungen die nötige Ausgangsleistung nicht erreichen.«

»Für die Prozessierung von Hochfrequenz-Transistoren ist bei Gatelängen von etwa 10 nm Schluss.«

»Die bildgebende Kernspintomographie wird durch die Quantenmagnetometrie in ihrer Auflösung und Detektionsgeschwindigkeit nicht wesentlich verbessert werden können.«

»Der Einsatz von Quantendetektoren und der Quantenelektronik ist aufgrund der benötigten Kühlung in unseren Daten- und Kommunikationsnetzen unrealistisch.«

HÖHEPUNKTE 2018

Highlights 2018



6. Juni 2018

**AUSGEZEICHNETER ORT
IM LAND DER IDEEN**

June 6, 2018

**LANDMARK IN THE
LAND OF IDEAS**



Ein winziger Quantensensor aus Diamant – Mit dieser Innovation konnte das Fraunhofer IAF die Jury in der Kategorie »Wissen schafft Gesundheit« überzeugen und wurde zu einem von 100 »Ausgezeichneten Orten im Land der Ideen« 2018.

Der am Fraunhofer IAF entwickelte Quantensensor ist so präzise, dass er Festplatten auf kleinste Defekte prüfen und sogar Hirnströme bei Raumtemperatur messen kann. Auch die Charakterisierung nanoelektronischer Schaltungen wird mit dem Sensor in einer nie dagewesenen Ortsauflösung möglich. Der jährlich vergebene Preis zeichnet Inspiration, Offenheit und mutiges Handeln aus und prämiert innovative Antworten auf gesellschaftliche Fragen.

Im November 2018 empfing Staatssekretärin Karin Schütz die 12 Preisträger aus Baden-Württemberg, darunter das Fraunhofer IAF, mit den Worten: »Baden-Württemberg braucht diesen Willen und innovative Ideen, die neue Technologien und den Menschen verbinden, neue Produkte und Dienstleistungen hervorbringen. Nur so bleiben wir ein starker und zukunftsfähiger Wirtschaftsstandort.«

A tiny quantum sensor made of diamond –with this innovation, Fraunhofer IAF was able to convince the jury in the »Knowledge Creates Health« category and became one of 100 »Landmarks in the Land of Ideas« in 2018.

The quantum sensor developed at Fraunhofer IAF is so precise that it can check hard disks for even the smallest defects and even measure brain waves at room temperature. The sensor can also be used to characterize nanoelectronic circuits with a spatial resolution that has never been achieved before. The prize is awarded annually and honours inspiration, openness and courageous action which give rise to innovative answers to social questions.

In November 2018, State Secretary Karin Schütz received the 12 winners from Baden-Württemberg, including Fraunhofer IAF, stating that »Baden-Württemberg needs this will and innovative ideas that connect new technologies with people and produce new products and services. Only in this way will we remain a strong and sustainable business location.«



**MORE
INFO**





12. – 14. März 2018

March 12 – 14, 2018

GERMAN MICROWAVE CONFERENCE (GEMIC)

Das Fraunhofer IAF organisierte die elfte Ausgabe der bedeutendsten Mikrowellenkonferenz im deutschsprachigen Raum. Unter dem diesjährigen Motto »Riding the Green Waves« befassten sich 250 Delegierte aus der ganzen Welt mit wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen auf dem Gebiet der Mikrowellen- und Radartechnik.

Fraunhofer IAF organized the eleventh edition of the most important microwave conference in the German-speaking world. Under this year's motto »Riding the Green Waves« 250 delegates from all over the world dealt with scientific and technical findings in the field of microwave and radar technology.



11. – 12. Oktober 2018

October 11 – 12, 2018

GERMAN MBE WORKSHOP

Das Fraunhofer IAF lud Vertreter aus Wissenschaft, Forschung und Industrie nach Freiburg zum diesjährigen German MBE-Workshop ein. Im Fokus stand das komplette Spektrum der Molekularstrahlepitaxie – von Ergebnissen aus der Grundlagenforschung über vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie.

Fraunhofer IAF invited representatives from science, research and industry to this year's German MBE Workshop in Freiburg. The focus was on the entire spectrum of molecular beam epitaxy – from the results of basic research to the many possible applications and use in industry.



Auf der Leitmesse für Prozessanalytik, Biotechnologie und Labortechnik präsentierte das Fraunhofer IAF seinen neuesten Quantenkaskadenlaser für die Echtzeit-Spektroskopie an Feststoffen und Flüssigkeiten. Das Herzstück des Messestandes war ein Demonstrator, der Medikamente berührungslos und in Echtzeit erkennt.



At the leading trade fair for process analysis, biotechnology and laboratory technology, Fraunhofer IAF presented its latest quantum cascade laser for real-time spectroscopy of solids and liquids. The heart of the booth was a demonstrator that detects drugs contactlessly and in real time.



Im Rahmen des Messestandes der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland stellten Forscher des Fraunhofer IAF ihr neuestes W-Band-Radar vor. Das Exponat zeigte, wie das Radar in einer Produktionshalle in verschlossene Verpackungen »blickt« und erfasst, ob die Warenlieferung fehlerhaft oder unvollständig ist.



At the booth of the Research Fab Microelectronics Germany, researchers from Fraunhofer IAF presented their latest W-band radar. The exhibit shows how the radar »looks into« a sealed packaging and detects whether the delivery of goods is faulty or incomplete.



WATCH
VIDEOS





10. September 2018

**FRAUNHOFER-TALER FÜR
PROF. DR. JOACHIM WAGNER**

September 10, 2018

**FRAUNHOFER THALER FOR
PROF. DR. JOACHIM WAGNER**

Zu seinem 65. Geburtstag, seinem 33. Dienstjubiläum bei Fraunhofer sowie als Abschied vom Fraunhofer IAF wurde Prof. Dr. Joachim Wagner mit dem Fraunhofer-Taler geehrt. Diese Ehrung wird an Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verliehen, die sich um die Fraunhofer-Gesellschaft besonders verdient gemacht haben.

On his 65th birthday, his 33rd anniversary at Fraunhofer and as a farewell to Fraunhofer IAF, Prof. Dr. Joachim Wagner (top right) was honored with the Fraunhofer Thaler. This award is given to employees who have rendered great services to the Fraunhofer-Gesellschaft.



2. – 5. April und 30. – 31. August 2018

PREISE



April 2 – 5 and August 30 – 31, 2018

PRIZES

Die »MRS Materials Research Society« zeichnete Taro Yoshikawa (links) auf dem Spring Meeting in Phoenix mit dem Preis für »Best Oral Presentation« aus. Markus Weiß (rechts) erhielt bei der IMWS-5G in Dublin den »Best Student Paper Award« für seine Forschungsarbeit zum Thema »Riemann pump-based RF Power DACs in GaN Technology for 5G Base Stations«.

The »MRS Materials Research Society« awarded Taro Yoshikawa (left) the prize for »Best Oral Presentation« at the Spring Meeting in Phoenix. At the IMWS-5G in Dublin Markus Weiß (right) received the »Best Student Paper Award« for his research on »Riemann pump-based RF Power DACs in GaN Technology for 5G Base Stations«.

MEHRLAGENKERAMISCHE AUFBAUTECHNIK FÜR HOCHFREQUENZSYSTEME

Multilayer Ceramic Assembly Technology for High Frequency Systems



»Unsere Module für Radar und Kommunikation nutzen seit einigen Jahren kostengünstige Leiterplatten. Die Performance dieser Technologie lässt aber bei Frequenzen über 100 GHz, wie sie für 5G- und 6G-Anwendungen gebraucht werden, deutlich nach. Bisher gab es dafür keine Alternative. Unser Patent bietet eine neuartige Aufbautechnik auf Keramiksubstraten. Wir hoffen, dass wir damit im besten Fall die Aufbautechnik revolutionieren können.«

»Our modules for radar and communication have been using cost-effective printed circuit boards for several years. The performance of this technology, however, declines significantly at frequencies above 100 GHz, as required for 5G and 6G applications. So far, there has been no alternative. Our patent offers a novel assembly technique on ceramic substrates. We hope that in the best case we can use it to revolutionize the assembly technology.«

READ THE FULL INTERVIEW WITH CHRISTIAN ZECH



In 2018, Christian Zech applied for a patent for a novel assembly technology together with Fraunhofer IKTS.



PATENTERTEILUNGEN

Granted Patents

C. Nebel, C. Widmann

Epitaxial Diamond Layer and method for the production thereof
 US 9,998,737 B2, 05.06.2018;
 USA (US)

C. Nebel, C. Widmann

Epitaktische Diamantschicht und Verfahren zu ihrer Herstellung
 10 2015 200 692 B4,
 11.10.2018; Deutschland (DE)

N. Lang, W. Müller-Sebert,

**C. Nebel, C. Schreyvogel,
 C. Widmann**
Substrate Holder, Plasma Reactor and method for depositing Diamond
 10,100,433 B2, 16.10.2018;
 USA (US)

V. Cimalla, V. Lebedev

Halbleiterbauelement und Verfahren zu seiner Herstellung
 11 2010 001 934 B4,
 19.07.2018; Deutschland (DE)

K. Köhler, R. Quay

Field-effect Transistor and method for the fabrication thereof
 US 10,115,803, 30.10.2018;
 USA (US)

PATENTANMELDUNGEN

Patent Applications

**T. Gerrer, D. Meder, R. Reiner,
 P. Waltereit, B. Weiß**

Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterbauelementes, Halbleiterbauelement und Träger
 10 2018 200 020.4, 02.01.2018;
 Deutschland (DE)

**V. Zürbig, C. Nebel,
 T. Erlbacher**

Semiconductor device comprising diamond and method for its manufacturing
 10 2018 202 633.5, 21.02.2018;
 Deutschland (DE)

**M. Ihle, S. Ziesche,
 C. Zech, B. Baumann**

Mehrlagenkeramische Aufbau-technik für Hochfrequenzsysteme
 10 2018 214 126.6, 21.08.2018;
 Deutschland (DE)

**T. Gerrer, V. Cimalla, A. Graff,
 M. Simon-Najasek**

Verfahren zum Bonden von zumindest einem Wafer und Substrat mit einem darauf befindlichen Wafer
 10 2018 210 658.4, 28.06.2018;
 Deutschland (DE)

M. Knapp

Acoustic-Wave-Resonator und elektronische Filterschaltung
 10 2018 207 825.4, 18.05.2018;
 Deutschland (DE)

R. Amirpour

Halbleiterbauelement, Verwendung eines Halbleiterbauelements
 PCT/EP2018/078919,
 22.10.2018, (WO)

V. Zürbig, C. Nebel

111-orientierter Diamant auf beliebig orientierten Diamantschichten
 10 2018 208 692.3, 01.06.2018;
 Deutschland (DE)

C. Giese, C. Nebel

Semi-Finished Product, method for the production thereof and Component Produced therewith
 15/912,147, 05.03.2018; USA (US)

A. Hülsmann, C. Zech

Selbstüberwachendes Hochfrequenzmodul
 10 2018 219 774.1, 19.11.2018;
 Deutschland (DE)

V. Cimalla, T. Gerrer,

M. Preschle, T. Yoshikawa
Method for Transferring at least one thin Film
 15/900248, 20.02.2018; USA (US)

A. Hülsmann

Vorrichtung und Verfahren zur Zündung eines Brennstoffgemisches im Brennraum einer Brennkraftmaschine
 10 2018 124 761.3, 08.10.2018,
 Deutschland (DE)

V. Lebedev

Verfahren zur Herstellung eines heterogenen elektroakustischen Resonators auf der Basis von unpoliertem Diamantfilm unter Verwendung von Adhäsion-Wafer-Bonding
 10 2018 217 892.5, 18.10.2018;
 Deutschland (DE)



»In meiner Vorlesung lernen die Studierenden die physikalischen Grundlagen von optischen und elektrischen Halbleiterbauelementen, die gezielt Quantisierungseffekte ausnutzen. Bei einer Exkursion ans IAF können sie dann »hands-on« den Reinraum, unser Laser-Applikationslabor sowie unsere Exponate und Demonstratoren erleben.«

»In my lecture, I introduce students to the physical principles of optical and electronic semiconductor devices that specifically exploit quantum effects. During an excursion to Fraunhofer IAF, they can experience the clean room, the application laboratory and get to know our exhibits and demonstrators.«

READ THE FULL INTERVIEW
WITH MARTIN WALTHER



Martin Walther has been teaching at the Karlsruhe Institute for Technology for 10 years.

WISSENSCHAFTLERINNEN UND WISSENSCHAFTLER DES FRAUNHOFER IAF SIND AUCH IN DER LEHRE TÄTIG

Scientists at Fraunhofer IAF Are Also Active in Teaching

Albert-Ludwigs-Universität Feiburg

»Verbindungshalbleiter«
»System Design Project«
»Nanobiotechnologie«
»Leistungselektronik«
»Mechanik«
»Master Project«
Prof. Oliver Ambacher

»Solid State and
Semiconductor Physics«
Dr. Christoph Nebel

»RF and Microwave
Circuits and Systems«
»RF and Microwave
Devices and Circuits«

»High-Resolution
Spectroscopy«
Lutz Kirste

»Design Course: RF and
Microwave Circuits and
Systems«
Dr. Rüdiger Quay

»Grundlagen der
Halbleiterphysik«
Prof. Joachim Wagner

Duale Hochschule Baden-Württemberg Lörrach

»Grundlagen Elektrotechnik«
»Signale und Systeme«
»Kommunikationstechnik«
Prof. Frauke Steinhagen

»Erstsemesterprojekt
Elektrotechnik«
Dominik Meier

Karlsruher Institut für Technologie

»Quanteneffektbauelemente
und Halbleitertechnologie«
Dr. Martin Walther



GUESTS

Every year, Fraunhofer IAF invites a number of visiting scientists to the institute to promote the exchange of scientific ideas and different cultures. In 2018, Fraunhofer IAF welcomed three guests:

- » Prof. Dr. Jörg Thietke, DHBW Lörrach
- » Prof. Thomas Volz, Macquarie University, Sydney
- » Marco Capelli, RMIT University, Melbourne

3

26

COMMITTEES

Scientists of Fraunhofer IAF are involved in 26 expert committees. These range from memberships in steering and program committees for scientific workshops and conferences, memberships in technical working groups and advisory boards of scientific institutions, to guest and associate editorships of scientific journals.

PUBLICATIONS

Scientists of Fraunhofer IAF authored and co-authored 103 publications in 2018. These include dissertations, electronic open access publications, articles in scientific journals as well as conference papers. All publications can be found at

<http://publica.fraunhofer.de/starweb/pub09/servlet.starweb>

103



»Ich konnte in meiner Dissertation zum ersten Mal zeigen, dass Graphen als aktives Elektrodenmaterial für Filter, wie sie in Smartphones und anderen Mobile Devices verbaut sind, verwendet werden kann.«

»In my dissertation I was able to show for the first time that graphene can be used as an active electrode material for filters such as those used in smartphones and other mobile devices.«

READ THE FULL INTERVIEW
WITH MARIUS KNAPP



Marius Knapp is a doctoral student at IAF. The defense of his thesis is scheduled for January 2019.

PROMOTIONEN

Doctoral Theses

Belén Amado-Rey

Analysis, design, and experimental evaluation of sub-THz power amplifiers based on GaAs metamorphic HEMT technology
[Universität Freiburg](#)

Lorenz Butschek

Modenverhalten von Quantenkaskadenlasern in miniaturisierten externen Resonatoren
[Universität Freiburg](#)

Birte-Julia Godejohann

GaN based high electron mobility transistors with high Al-content barriers
[Universität Freiburg](#)

Markus Reusch

AlN-based Electro-Acoustic Sensors for Analytics in Liquids – From Material Development to the Device
[Universität Freiburg](#)

Björn Tegetmeyer

Luminescence properties of SiV-centers in diamond diodes
[Universität Freiburg](#)



»Die Mischung zwischen meiner spanischen und der deutschen Kultur war für meine Forschung sehr produktiv und führte zu neuen Ergebnissen und interessanten wissenschaftlichen Publikationen.«

»The mixing between my Spanish and the German culture, with different ways of thinking, was highly productive for my research and gave rise to new results and interesting scientific publications.«

READ THE FULL INTERVIEW
WITH BELÉN AMADO-REY



Belén Amado-Rey from Cáceres, Spain, completed her dissertation on GaN power amplifiers in 2018.

MASTERARBEITEN Michael Basler

Master Theses

*Entwurf und Charakterisierung monolithisch integrierter Logikschaltungen auf einer lateralen 600V GaN-on-Si Technologie
Hochschule Reutlingen*

Ronja Khelifa

*Fermin Level Pinning in GaAsSb Schottky Barriers
Universität Freiburg*

Dario Peris Mari

*A concept study for a highly integrated and highly compact DC charger for electromobility
Universität Freiburg*

Lucas Pinti

*Charakterisierung von Diamant-basierten Dioden für hohe Spannungen
Universität Freiburg*

Tobias Friedrich Simon

*Multiband 4.4 GHz/5.8 GHz Doherty Amplifier in Hybrid and MMIC Configuration For 5G Applications
Universität Freiburg*

ORGANIGRAMM

Organigram

Dr. Anne-Julie Maurer
MARKETING &
COMMUNICATIONS
☎ -282



Dr. Rüdiger Quay
DIVISION DIRECTOR
BUSINESS UNITS
☎ -843



Dr. Michael Schlechtweg
HIGH FREQUENCY
ELECTRONICS
☎ -534



Dr. Michael Mikulla
POWER
ELECTRONICS
☎ -267



Dr. Robert Rehm
PHOTO -
DETECTORS
☎ -353



Dr. Ralf Ostendorf
SEMICONDUCTOR
LASERS
☎ -638



Dr. Christoph Nebel
DIAMOND
DEVICES
☎ -291



KONTAKT / Contact

Sie erreichen uns per E-Mail unter
Vorname.Nachname@iaf.fraunhofer.de
You may reach us via e-mail at
first name.surname@iaf.fraunhofer.de

☎ +49 761 5159 + Durchwahl / direct dial



Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher
DIRECTOR
 ☎ -410

Dr. Jutta Kühn
DIVISION
DIRECTOR
DEPARTMENTS
 ☎ -842



Dr. Martin Walther
DIVISION
DIRECTOR
RESEARCH
INFRA-
STRUCTURE
 ☎ -434



Dr. Tim Stadelmann
EPITAXY
 ☎ -385



Dr. Beatrix Schwitalla
ADMINISTRATION
 ☎ -414



Dr. Wolfgang Bronner
TECHNOLOGY
 ☎ -822



Christa Wolf
TECHNICAL
SERVICES
 ☎ -428



Dr. Jutta Kühn
MICRO-
ELECTRONICS
 ☎ -842



Jörg Seibel
INFORMATION
TECHNOLOGY
 ☎ -559



Dr. Marcel Rattunde
OPTO-
ELECTRONICS
 ☎ -643



Dr. Harald D. Müller
QUALITY
MANAGEMENT
 ☎ -458



FORSCHUNGSFABRIK MIKRO- ELEKTRONIK DEUTSCHLAND

Research Fab Microelectronics Germany

INSTITUTES

13 research institutes, among them Fraunhofer IAF, bundle their competences to become a one-stop shop for technologies and systems. The aim is to be able to offer customers from corporations, small and medium-sized enterprises as well as universities the entire value chain for microelectronics and nanoelectronics in an uncomplicated manner and from a single supplier.

13

2000

SCIENTISTS

With 2000 scientists, the Research Fab Microelectronics Germany offers the largest pool for technologies and intellectual property rights in the field of smart systems. This new form of cooperation will make a major contribution to strengthening European industry's competitiveness internationally.

TECHNOLOGY PARKS

Of the four technology parks, IAF is involved in three: »Compound Semiconductors«, with modern materials for power saving applications and communications; »Heterointegration«, the latest combinations of silicon and other semiconductors; and »Design, Rest and Reliability« for design and design methods, quality and security.

4



INVESTMENTS

The Federal Ministry of Education and Research (BMBF) is funding the FMD with a total of € 350 million. Fraunhofer IAF has received € 16 million to strengthen the development of innovative solutions in high frequency and power electronics, e. g. for radar sensors, voltage converters or high-speed wireless data transmission.

350

4

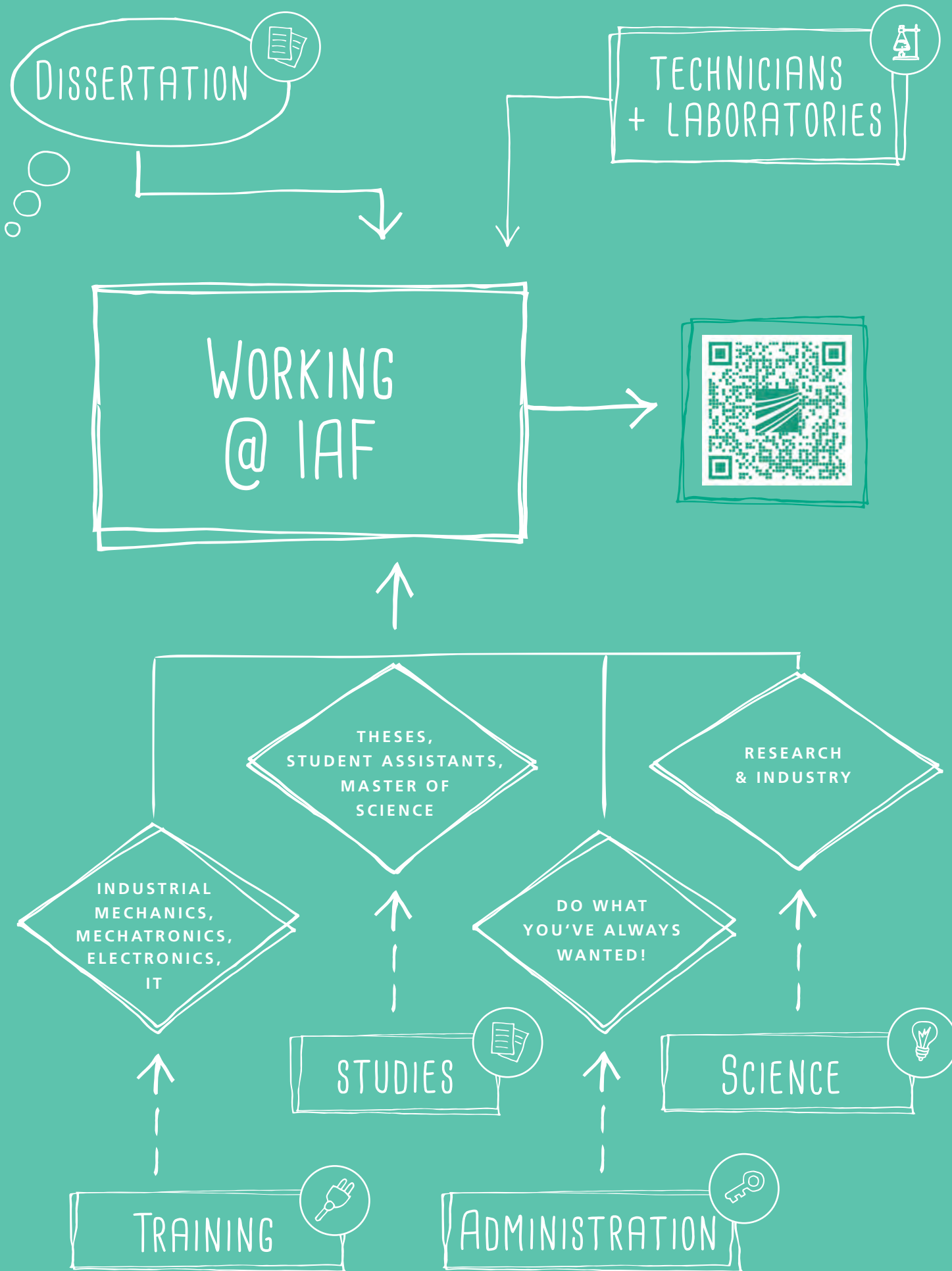
EQUIPMENT

In 2018, the BMBF-funded project procured four new machines for the next generation of semiconductor devices at Fraunhofer IAF. Among them was new equipment for the epitaxy and processing of III-V compound semiconductors for the production and integration of electronic devices and circuits as well as their characterization.

INNOVATION DAY

On the first Innovation Day 2018, the cooperation partners, industry and the ministry ceremoniously inaugurated the first integration line. In the accompanying trade exhibition Fraunhofer IAF presented its powerful radar sensor, which analyzes packaged goods in real time.

1





FÜR BEWERBER

Jobs@IAF

Ob Sie während Ihres Studiums, als Berufsanfänger oder mit wertvoller Berufserfahrung bei uns einsteigen – das Fraunhofer IAF bietet Ihnen vielfältige und spannende Aufgaben in wissenschaftlichen, technischen und administrativen Berufen.

Whether you join us during your studies, as a young professional or with valuable work experience – Fraunhofer IAF offers you a wide range of exciting jobs in scientific, technical and administrative professions.

DAS ERWARTET SIE: *What We Offer:*

■ ein modern ausgestattetes und international geprägtes Arbeitsumfeld
a working environment with modern equipment and an international character

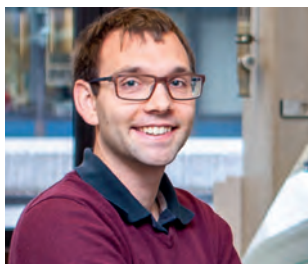
■ enge Kontakte zur Industrie und zu öffentlichen Auftraggebern
close contacts to industry and public authorities

■ eigenverantwortliches Arbeiten und kreatives Mitgestalten
independent work and active involvement

■ persönliche Entwicklungsmöglichkeiten durch Weiterbildungsmaßnahmen
personal development opportunities through further training programs

■ Vereinbarkeit von Familie und Beruf, z. B. durch ein Mit-Kind-Büro
compatibility of family and career, e.g. through a co-child office

■ wöchentliche Sportangebote zum Ausgleich und zur Fitness
weekly sports offers for balance and fitness



»Actually, IAF is like a hidden champion, with cutting-edge research on a world-class level.«



»I was fascinated by the applied research at IAF. So I just took a leap of faith.«



»In research, I work on things that are not commonplace.«



»The idea behind my dual position is the promotion of young researchers.«



»Every piece is a new challenge that requires new ideas and approaches.«



»Creating a relationship built on trust is important for the team spirit.«



READ THE FULL INTERVIEWS OF YOUR FUTURE COLLEAGUES



QUANTENSPRUNG IST FÜR MICH ...

Quantum Leap Means for Me ...

$$\rho(\omega, T) =$$



»...der Sprung in eine interessante und vielversprechende Zukunft.«

Dr. Christoph Schreyvogel erforscht am IAF die Homoepitaxie von dotierten Diamantschichten für die Realisierung von leistungselektronischen Bauelementen der nächsten Generation.

$$= \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} e^{-\frac{\hbar \omega}{k T}}$$

IMPRESSUM

Imprint

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF

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

MARKETING & KOMMUNIKATION

Marketing & Communications

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

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck nur
mit Genehmigung der Institutsleitung
*All rights reserved. Reproduction requires
the permission of the director of the institute.*

© Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF,
Freiburg 2019

REDAKTION

Editorial Board

Anne-Julie Maurer, Laura Hau, Sandra Schneider,
Violetta Budak, Oliver Ambacher

KONZEPT, LAYOUT

Concept, Layout

subculture urban media, Freiburg

LAYOUT, SATZ, DRUCK

Layout, Typesetting, Printing

netsyn, Joachim Würger, Freiburg

BILDNACHWEIS

Picture credits

AIM Infrarot-Module GmbH, 52
Airbus Defence and Space GmbH, 53
Birgit Meyer, 2–4, 22, 30, 38, 43, 46, 54, 59 (Insert),
61 (Fig. 3), 67 (Insert), 71
Carl Attard, Pexels, 13
Chalmers University of Technology, 37
Deutschland – Land der Ideen, Bernd Brundert, 84 (Right)
Deutschland – Land der Ideen, Wolfram Scheible, 84 (Left)
Forschungsfabrik Mikroelektronik FMD, 13, 96–97
Fraunhofer CAP, 13
Fraunhofer HHI, 27
Fraunhofer IPM, 61
Fraunhofer-Gesellschaft, Bernhard-Peter Schmidt, 53 (Fig. 3)
Fraunhofer VμE, Theresa Leberle, 86 (Bottom)
IBM Research, Christopher Sciacca, 28
NVision Imaging Technologies GmbH, 72
Petair, Fotolia, 13
Robert Tannhäuser, 85 (Top)
romaset, Fotolia, 73
Science Photo Library, Mark J. Winter, Cover
SIGMA Medizin-Technik GmbH, 66
Technische Universität Wien, 44
Universität Freiburg, Klaus Polkowski, 6, 95 (Ambacher)

All others © Fraunhofer IAF, Violetta Budak, Laura Hau,
Liana Marek, Sandra Schneider, Sandrine Wagner



MESSEN & VERANSTALTUNGEN 2019

Fairs & Conferences 2019

FUTURE SECURITY

14 – 15 March, Berlin

44th FREIBURG INFRARED COLLOQUIUM

19 – 20 March, Freiburg

HANNOVER MESSE

1 – 5 April, Hannover

LASER WORLD OF PHOTONICS

24 – 27 June, Munich

DPG HERBST- TAGUNG

*»Quanten- und Informations-
technologie«*

23 – 27 September, Freiburg

EUROPEAN MICROWAVE WEEK

29 September – 4 October, Paris

**FRAUNHOFER - INSTITUT FÜR
ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF**

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

Director:
Prof. Dr. Dr. Oliver Ambacher

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

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