Jahresbericht 2024 / 2025

Leibniz
Ferdinand
Braun
Institut

Technologie trifft Know-how – vom Design bis zum Prototyp

… dafür steht das Ferdinand-Braun-Institut: entlang der kompletten Wertschöpfungskette, vom Design über die Chipentwicklung und -fertigung bis hin zu einsatzfähigen Modulen und Prototypen. Diese vertikale Integration zählt zu unseren besonderen Stärken. Sie ermöglicht es uns, photonische, elektronische und quantentechnologische Schlüsselkomponenten für neuartige Anwendungen zu realisieren. So entstehen maßgeschneiderte und praxisnahe Lösungen, von denen unsere Gesellschaft profitiert, sei es in der Medizintechnik, Sensorik, Materialbearbeitung oder bei Zukunftstechnologien für Raumfahrt- und Quantenapplikationen. Als Forschungspartner von Industrie und Wissenschaft treiben wir nicht nur technologische Innovationen voran, sondern liefern wichtige wissenschaftlich-technische Impulse in die Wirtschaft – in der Region, deutschlandweit und international.

Basis unserer Entwicklungen ist die exzellent ausgestattete Reinraum- und Labor-Infrastruktur am FBH. Diese öffnen wir zukünftig verstärkt auch für externe Partner – insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen. Die APECS-Pilotlinie, die kürzlich im Rahmen des European Chips Act gestartet ist, ist ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung. Technologiesouveränität, resiliente Fertigungsketten und globale Wettbewerbsfähigkeit sind Ziele der Europäischen Union, die wir als Teil der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) unterstützen. Gemeinsam mit weiteren europäischen Partnern erweitern wir die Fertigungskapazitäten für Halbleiterchips in der EU mit der institutsübergreifenden Fertigungslinie für heterointegrierte Chiplet-Technologien.

Erfolgreiche Technologieentwicklung ist untrennbar mit qualifizierten Fachkräften verbunden. Parallel zur APECS-Pilotlinie ist daher das bundesweite Leitprojekt skills4chips gestartet, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird. Im Rahmen des Projekts baut ein interdisziplinär aufgestelltes Team, das vom FBH koordiniert wird, eine nationale Bildungsakademie für Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik auf – die Microtec Academy. Sie schafft passgenaue Qualifizierungsangebote für die berufliche ebenso wie die akademische Aus- und Weiterbildung.

Weder Forschung, Technik, noch Verwaltung oder andere wissenschaftsunterstützende Bereiche funktionieren ohne das Engagement der Menschen dahinter. Ein großes Dankeschön geht daher an unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die mit ihrem Wissen, ihrer Kreativität und ihrem Einsatz jeden Tag dazu beitragen, dass wir gemeinsam so viel erreichen. Ebenso danken wir unserem treuen Kundenkreis und unseren langjährigen Partnern für das Vertrauen und die erfolgreiche Zusammenarbeit – wir freuen uns schon jetzt auf viele weitere spannende Projekte mit Ihnen!

Unser besonderer Dank gilt dem Land Berlin und dem Bund, die unsere Forschung mit ihrer Förderung erst möglich machen.

Was wir im letzten Jahr alles bewegt und erreicht haben, erfahren Sie auf den kommenden Seiten. Viel Freude beim Lesen und Entdecken!

Patrick Scheele & Karin-Irene Eiermann

Profil & Struktur — 5

Profil – die Zukunft mit Spitzenforschung gestalten — 6

So sind wir organisiert – das FBH und seine Strukturen — 7

Wie wir uns entwickelt haben – Zahlen und Fakten — 9

Das bieten wir – wegweisende Technologien und Dienstleistungen — 11

Highlights — 13

Technologiesouveränität – mehr Chips „made in Europe“ (APECS) — 15

Fachkräftesicherung im Hightech-Bereich – skills4chips und Microtec Academy — 19

Saubere und sichere Energie – Diodenlaser-Pumpmodule für künftige Fusionskraftwerke — 21

FMD-Themen im Fokus: Green ICT, QNC Space und zugehörige Projekte — 27

Nachhaltige Technologien im Visier: das erste Green ICT Camp — 31

Gemeinsam erfolgreich: Leibniz, FMD und Co. — 37

Besondere Momente, Besuche und internationale Vernetzung — 51

Forschung – Ergebnisse & Entwicklungen — 57

Das Ferdinand-Braun-Institut organisiert seine F&E-Aktivitäten im Rahmen von Labs und Departments in vier Forschungsfeldern — 59

Photonik — 61

Quantenlichtmodule für hochentwickelte Sensoriksysteme — 63

Milchanalyse neu gedacht – mit Diodenlaser-basierter Raman-Spektroskopie — 65

Neuartige GaAs-basierte PIC-Laserquellen für Quanten-, Spektroskopie- und Biosensoranwendungen — 67

Design und Technologie für komplett halbleiterbasierte oberflächenemittierende Laser mit einem photonischen Kristall — 69

Alltagstaugliche Fern-UVC-LED-Technologie: höhere Leistung und Zuverlässigkeit — 71

Integrierte Quantentechnologie — 73

Entwicklung eines mikro-integrierten, optisch gepumpten Magnetometers für biomedizinische Anwendungen — 75

Mikrointegriertes Modul mit Phasen- und Amplitudenmodulatoren für den Einsatz in einer kompakten optischen Strontium-Atomuhr — 77

Optimierte Lasersysteme für Quantentechnologien mittels datengetriebener Modellierung — 79

Optische Quantenbauelemente der Zukunft: Optimierung und 3D-Nanodruck von plasmonischen Polarisationswandlern durch maschinelles Lernen — 81

Festkörper-Immersionslinsen in Diamant – für die Entwicklung von Quantennetzwerken — 83

III/V-Elektronik — 85

Schlüsseltechnologien für D-Band-Anwendungen und darüber hinaus: InP HBT MMIC und Heterointegrationsansatz — 87

Digital GaN-basiertes Transceiver-Modul für zukünftige grüne 5G-Netze — 89

Weltweit erster Terahertz-Zeilenscanner für Echtzeitsysteme realisiert — 91

Vertikale Hochspannungs-GaN-Membran-*pn*-Dioden auf Wolframsubstraten mittels Substrattransfer — 93

Dielektrika im atomaren Maßstab für zukünftige Bauelemente — 95

Fortschritte bei der Prüfung von RF-Leistungstransistoren: präzise Automatisierung mit maschinellem Lernen — 97

Annex — 99

Wissenschaftliche Exzellenz – Personalia & Auszeichnungen — 101

Veranstaltungen – Konferenzen, Workshops & Messen — 107

Forschung für alle — 109

Wie Sie uns erreichen — 113

Impressum — 115

Profil & Struktur

Inhaltsverzeichnis

Profil – die Zukunft mit Spitzenforschung gestalten

Das Ferdinand-Braun-Institut ist eine anwendungsorientierte Forschungseinrichtung auf den Gebieten der Hochfrequenzelektronik, Photonik und Quantenphysik. Es erforscht und realisiert elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern.

Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickeln wir vom nahinfraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungen liegen unter anderem in Medizintechnik, Materialbearbeitung und der integrierten Quantentechnologie. Hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen realisiert unser Institut für energieeffiziente Mobilfunksysteme und die Leistungselektronik. Darüber hinaus realisieren wir elektronische Bauelemente auf Basis von Wide- und Ultrawide-Bandgap-Halbleitern für effiziente und kompakte Systeme zur Leistungswandlung.

Ein weiterer wichtiger Teil unserer Aktivitäten ist es, den wissenschaftlichen Nachwuchs und die Fachkräfte von morgen zu fördern. Wir engagieren uns aktiv in der akademischen Lehre und Ausbildung – in enger Zusammenarbeit mit Universitäten und Hochschulen in ganz Deutschland. Unter anderem betreuen wir Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen.

Seit über 25 Jahren setzen wir uns für die Sicherung von Fachkräften in der beruflichen Bildung ein. Wir bilden nicht nur selbst Mikrotechnolog*innen aus, unser Ausbildungsteam baut zudem gerade die deutschlandweite Plattform Microtec Academy auf, die alle Qualifikationsstufen adressiert – von Einsteigerkursen über spezialisierte Weiterbildungen bis hin zu anerkannten Qualifikationen auf Bachelor- und Master-Niveau. (siehe Seite 19)

Mehr zu uns und unserem Profil.

So sind wir organisiert – das FBH und seine Strukturen

Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik organisiert seine Forschungsaktivitäten in Departments und Labs in den vier Forschungsbereichen III/V-Technologie, III/V-Elektronik, Photonik und Integrierte Quantentechnologie. Hierbei kooperiert das FBH im Rahmen von Joint Labs eng mit Universitäten. Es verfügt über eine effiziente Verwaltung, die die Forschung und Entwicklung in den Bereichen Personalwesen, Finanzen und Controlling, Beschaffung und IT-Dienste unterstützt. Für den reibungslosen Betrieb der Labore und Reinräume sorgt das Team der Technischen Dienste. Der Stab wird ergänzt durch ein prozessorientiertes Qualitätsmanagement und den Bereich Kommunikation. Mit seinem Wissenschaftsmanagement fördert das Institut darüber hinaus die berufliche Aus- und Weiterbildung in der Hochtechnologie und Begleitforschung in diesem Bereich.

Die FBH gGmbH ist seit 01.01.2021 eine 100-prozentige Tochter des Landes Berlin und ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft.

Mehr über unsere organisatorische Struktur inklusive Aufsichtsrat, wissenschaftlichem Beirat und Organigramm.

Leibniz-Gemeinschaft

Die Leibniz-Gemeinschaft verbindet 96 selbstständige Forschungseinrichtungen. Ihre Ausrichtung reicht von den Natur-, Ingenieur- und Umweltwissenschaften über die Wirtschafts-, Raum- und Sozialwissenschaften bis zu den Geisteswissenschaften. Leibniz-Institute widmen sich gesellschaftlich, ökonomisch und ökologisch relevanten Fragen. Die zugehörigen Institute beschäftigen rund 21.400 Personen. Das Finanzvolumen liegt bei 2,3 Milliarden Euro

leibniz-gemeinschaft.de

Inhaltsverzeichnis

Wie wir uns entwickelt haben – Zahlen und Fakten

Gegründet 1992

2023		2024
383		393 Team
156		155 Wissenschaftlerinnen & Wissenschaftler
49		47 Promovierende
30		29 Studentische Hilfskräfte & Bachelor-/Masterstudierende
9		12 Auszubildende
180		163 Drittmittelprojekte
91		105 Referierte Publikationen
316		273 Patente
138 (28)		161 (33) Vorträge (davon eingeladene)
Revenue (in million €) 19.3		19.6 Grundfinanzierung: Land Berlin & Bund (1 Punkt entspricht 100.000 €)
17.2		20.9 Öffentliche Drittmittel
6.8		4.0 Industrielle Auftragsforschung

Inhaltsverzeichnis

Ihr Partner für die gesamte Prozesskette

So können Sie mit uns zusammenarbeiten:

- **Gemeinsames Forschungsprojekt**
- **Industrieauftrag**
- **Direkter Verkauf oder Lizenzierung**

Interessiert?

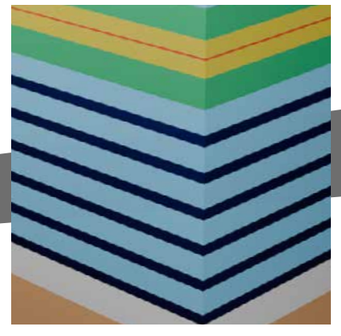
Sprechen Sie uns an: sales@fbh-berlin.de

Das bieten wir – wegweisende Technologien und Dienstleistungen

Basierend auf unserem umfassenden Know-how, engagierten Mitarbeitenden und mehr als 2.000 qm bestens ausgestatteten Reinraum- und Laborflächen bieten wir die gesamte Wertschöpfungskette im eigenen Haus an: von maßgeschneiderten F&E-Leistungen in Epitaxie und Prozessierung über die kundenspezifische Chip- und Modulentwicklung bis hin zu Plug-&-Play-Prototypen.

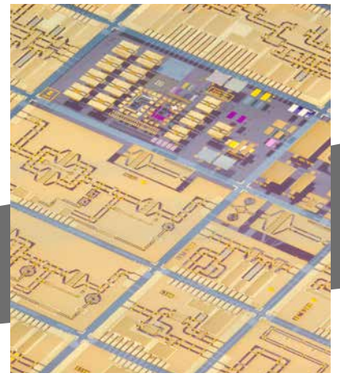
Wir bündeln zudem unsere Fähigkeiten mit denen weiterer Forschungsinstitutionen: Unter anderem kooperieren wir in derzeit zehn Joint Labs eng mit Wissenschaftler*innen verschiedener Universitäten und Hochschulen. Als Teil der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) entwickeln wir im Rahmen der Pilotlinie Advanced Packaging and Heterogeneous Integration for Electronic Components and Systems (APECS) gemeinsam mit 14 Partnern neuartige Ansätze für Chiplet-Technologien in Europa. Durch die Integration verschiedener Technologien auf einer einzigen Plattform ist APECS wegweisend im Bereich des hochentwickelten Packaging und der heterogenen Integration.

Erfahren Sie mehr über unsere Transferaktivitäten und F&E-Dienstleistungen für Kunden und Partner in Industrie und Forschung.

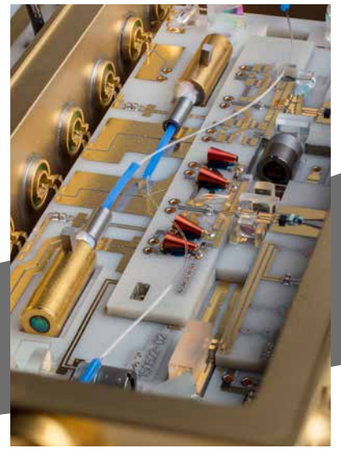


Design

Epitaxie

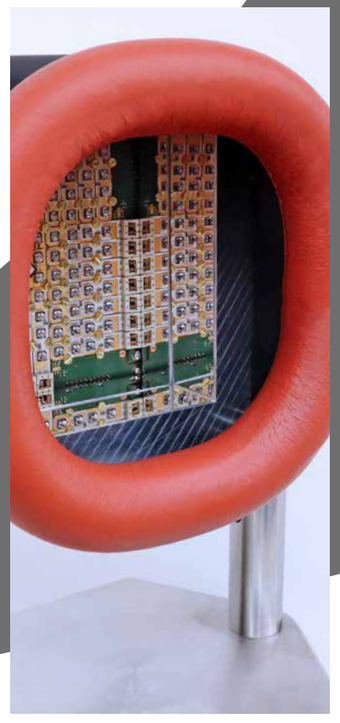


Waferprozessierung



Packaging & Modulentwicklung

Zuverlässigkeits-prüfungen



Prototyping

Inhaltsverzeichnis

Highlights

Inhaltsverzeichnis

Technologiesouveränität – mehr Chips „made in Europe“ (APECS)

So lautet das erklärte Ziel der Europäischen Union, die den Anteil der in Europa produzierten Halbleiter bis 2030 von 10 auf 20 Prozent erhöhen will.

Vor diesem Hintergrund ist Ende 2024 die Pilotlinie für **„Advanced Packaging and Heterogeneous Integration for Electronic Components and Systems“ – kurz APECS** – gestartet. Sie ist ein wichtiger Baustein des EU Chips Acts, um Chiplet-Innovationen voranzutreiben und die Forschungs- und Fertigungskapazitäten für Halbleiter in Europa zu erhöhen. Wir sind eines der in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) kooperierenden Institute, die gemeinsam mit weiteren europäischen Partnern die APECS-Pilotlinie aufbauen. Ziel ist es, Europas technologische Resilienz zu stärken und die globale Wettbewerbsfähigkeit in der Halbleiterindustrie zu steigern. Innovative Halbleitertechnologien und -anwendungen sollen auch den digitalen Wandel und „grüne“ Technologien voranbringen.

Die Pilotlinie ermöglicht sowohl großen Industrieunternehmen als auch KMU und Start-ups einen niederschwelligen Zugang zu Cutting-Edge-Technologien und sorgt für sichere, robuste Halbleiter-Wertschöpfungsketten. APECS wird durch Chips Joint Undertaking und durch nationale Förderungen von Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Österreich, Portugal und Spanien im Rahmen der „Chips for Europe“-Initiative kofinanziert. Die Gesamtfinanzierung für die APECS-Pilotlinie beläuft sich auf 730 Millionen Euro über 4,5 Jahre – davon fließen etwa 33 Millionen Euro in die technologische Kompetenz am FBH.

Mit dieser Unterstützung bauen wir innerhalb der Pilotlinie unser technologisches Angebot in zwei Schwerpunktfeldern aus. Diese liegen einerseits bei bipolaren Chiplets für Hochfrequenzanwendungen im W- und D-Band auf Basis von Indiumphosphid (InP) und andererseits bei Laser-Chiplets auf Basis von Galliumarsenid (GaAs). Die Förderung umfasst sowohl den Ausbau der erforderlichen Anlagentechnik auf den neuesten technologischen Stand als auch die Etablierung der Hochfrequenz-Design-Umgebung für die Nutzer*innen des InP-Prozesses.

APECS
European Chiplet Innovation

Inhaltsverzeichnis

Reinstwasser ist hochgereinigtes Wasser, das sehr aufwendig aufbereitet wird und für die Chipherstellung unverzichtbar ist. Im Rahmen des mit 3 Millionen Euro geförderten EFRE-Projekts „Applikationslabor III/V-Komponenten für Aerospace“ installieren wir derzeit eine **Reinstwasseranlage der neuesten Generation** für unseren Reinraum-1 (RR-1). Damit können wir Halbleiterbauelemente mit der geforderten Performance für die Luft- und Raumfahrt fertigen – mit energieeffizienteren und nachhaltigeren Prozessen. Auch der Technikraum wird mit energieeffizienten Beleuchtungs- und Belüftungssystemen ausgestattet. Ein komplexes Projekt mit vielen Beteiligten: von der Projektleitung, dem Vergabemanagement über Prozessverantwortliche bis hin zum technischen Personal, das die Installationen betreut. Ab Sommer 2026 soll es dann es im RR-1 einmal ebenso modern zugehen wie im RR-2, in dem dieses Bild entstanden ist.

Praxisbezogene Erfahrungen in der Hightech-Ausbildung.

Fachkräftesicherung im Hightech-Bereich – skills4chips und Microtec Academy

Resiliente Halbleiter-Wertschöpfungsketten mit höheren Fertigungskapazitäten erfordern gut ausgebildete Fachkräfte. Daher ist zeitgleich das vom Ferdinand-Braun-Institut koordinierte **bundesweite Leitprojekt skills4chips** gestartet. Es zielt auf die Sicherung von Fachkräften für Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik. Das Vorhaben profitiert von den langjährigen Erfahrungen und den exzellenten Kontakten des am FBH angesiedelten Aus- und Weiterbildungsnetzwerks ANH Berlin. skills4chips wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 12 Millionen Euro vier Jahre lang gefördert.

Im Projekt baut das skills4chips-Team die im BMBF-Vorläuferprojekt BM = x³ gestartete Microtec Academy zu einer nationalen Bildungsakademie für Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik aus. Deren Angebote reagieren auf den wachsenden Fachkräftebedarf entlang der gesamten Bildungskette, von der Berufs- und Studienorientierung über die duale Ausbildung, den Quereinstieg sowie die Fort- und Weiterbildung. Mit akkreditierten Aufstiegsfortbildungen auf Bachelor- und Master-Niveau schlägt die Microtec Academy zugleich eine Brücke zwischen beruflicher und akademischer Bildung.

Gemeinsam mit einem bundesweiten Verbundteam aus beruflichen Schulen, Hochschulen und anderen Technologieexperten entstehen neue, passgenaue Bildungsangebote für alle Qualifikationsstufen. Die Bildungsinfrastruktur verbindet reale Reinraum- und Laborumgebungen mit einem virtuellen Technologielabor. Nach dem Baukastenprinzip bietet die Akademie bedarfsgerechte Fort- und Weiterbildungen im Blended-Learning-Format – einer Mischung aus Präsenz- und Online-Angeboten.

Inhaltsverzeichnis

Einer der Räume der National Ignition Facility, einer laserbasierten Forschungsanlage für Trägheitseinschlussfusion (ICF), in dem der Laser verstärkt wird.

Saubere und sichere Energie – Diodenlaser-Pumpmodule für künftige Fusionskraftwerke

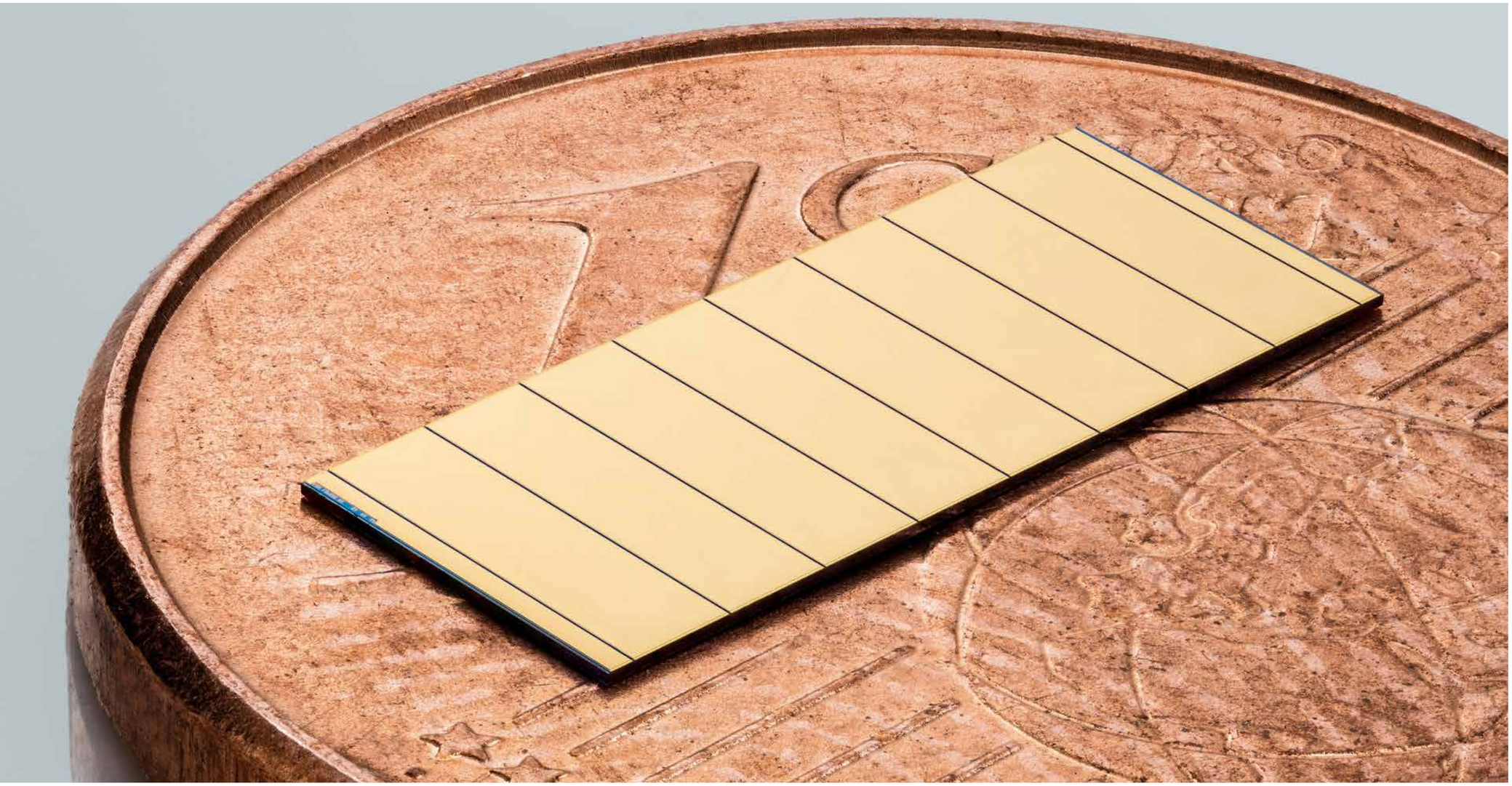
Ende 2022 ist es US-Forschern erstmalig gelungen, mehr Energie aus einer Fusionsreaktion zu gewinnen als für die Zündung des Plasmas mittels Großlaser zugeführt wurde. Damit wurde der Grundstein für eine saubere, sichere und praktisch unerschöpfliche Energiequelle der Zukunft gelegt – und weltweit eine neue Dynamik in der Fusionsforschung ausgelöst.

Hochleistungs-Laserdioden sind eine Schlüsselkomponente für künftige Fusionskraftwerke. Sie werden in riesigen Stückzahlen mit hoher Ausgangsleistung und Effizienz benötigt. Diese Herausforderungen im Blick, will das im Herbst 2024 gestartete Verbundprojekt **DioHELIOS** die Laserperformance auf Chipebene weiter optimieren, ergänzt durch neuartige Automatisierungsprozesse und kostengünstige Packaging-Technologien. An dem BMBF-geförderten Projekt sind ams-OSRAM, das Ferdinand-Braun-Institut, das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Jenoptik, Laserline und TRUMPF beteiligt. Die Anforderungen an Pumpmodule für Fusionskraftwerke sind besonders anspruchsvoll.

Inhaltsverzeichnis

Benötigt werden 30 bis 50 Gigawatt Laserleistung, die Kosten sollen dabei um das etwa Zehn- bis Zwanzigfache auf etwa 0,01 Dollar pro Watt sinken. Zugleich müssen die Lieferkapazitäten mindestens um das Zehnfache steigen.

Wir verfügen über langjährige und umfassende Erfahrungen, um die anspruchsvollen Projektziele zu erreichen. Seit Jahren reizen wir die Effizienz- und Leistungsgrenzen unserer Diodenlaser für Hochleistungsanwendungen immer weiter aus: Wir entwickeln Kilowatt-Laserbarren, die nicht nur zum Pumpen, sondern zunehmend auch in direkten industriellen Anwendungen eingesetzt werden. Gitterstabilisierte Laserbarren nutzen wir für das Pumpen von Festkörper- und Faserlasern in der Materialbearbeitung und unsere gitterstabilisierten Multi-Junction-Diodenlaser liefern besonders hohe Ausgangsleistungen für Kurzpuls-LiDAR-Anwendungen. Zudem verfügen wir über eine patentierte Facettentechnologie und steigern die Ausbeute mithilfe von künstlicher Intelligenz.



Leistungsstarke Laserbarren wie diese sind eine Schlüsselkomponente für Fusionskraftwerke der Zukunft.

Inhaltsverzeichnis

Bei unserem **Team der IT-Services** geht es stets turbulent zu. Fünf Kollegen, eine Kollegin und ein Auszubildender sorgen für reibungslose Abläufe rund um IT-Sicherheit, Telefonie, Medientechnik und Software am Institut. Mehr als 1.600 Anfragen wurden über das institutseigene IT-Ticketsystem alleine im Jahr 2024 bearbeitet – kein Wunder bei über 700 Endgeräten, 120 Servern, 150 aktiven Netzwerkkomponenten und vielem mehr. Wichtige laufende Vorhaben am Institut sind der Ausbau beziehungsweise die Erneuerung der Netzwerkinfrastruktur in unseren Reinräumen, die Einführung eines neuen ERP-Softwaresystems und eines Instant-Messaging-Systems. Hinzu kommen umfassende Maßnahmen gegen Brute Force Angriffe, Viren und Malware – kurzum, alles was unsere IT-Infrastruktur und seine Endgeräte bestmöglich sichert.

Hady Yacoub stellt in seinem Vortrag auf der Green ICT Connect-Konferenz die neuesten Erkenntnisse über den ökologischen Fußabdruck des Indiumphosphid-Prozesses vor.

FMD-Themen im Fokus: Green ICT, QNC Space und zugehörige Projekte

Das FBH ist eines der 15 in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) kooperierenden Institute. Mit insgesamt mehr als 5.400 Mitarbeitenden bündelt die FMD eine einzigartige Kompetenz- und Infrastrukturvielfalt unter einem Dach. Das macht sie zu einem zentralen Ansprechpartner für alle Fragestellungen rund um die mikro- und nanoelektronische Forschung und Entwicklung in Deutschland und Europa. Die FMD-Aktivitäten zielen unter anderem auf grüne Kommunikationstechnologien, neuartige Rechentechnik und Technologiesouveränität.

Unter die Lupe genommen: die Ökobilanz von Halbleiterprozessen

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Großprojekts **Green ICT @ FMD** koordiniert das FBH den Hub „Energiesparende Kommunikationsinfrastrukturen“. Der Fokus der zugehörigen Aktivitäten bei uns am Institut liegt auf drahtloser Kommunikation (Digitalisierung, mm-Wellen-Transceiver sowie 140 Gigahertz-Links) sowie Leistungskonvertern. In diesem Kontext nehmen wir seit Anfang 2024 auch die Öko-Bilanz unseres Indiumphosphid-Prozesses unter die Lupe: von den Materialen bis hin zum Energieverbrauch während der Fertigung.

Das Halbleitermaterial Indiumphosphid (InP) und seine Verbindungen sind aufgrund ihrer hohen Elektronenbeweglichkeit hochattraktiv für die Hochfrequenz- und Breitbandelektronik. Hier zeigt InP bei hohen Frequenzen höhere Ausgangsleistungen und bessere Wirkungsgrade als die anderen gängigen Halbleiter. Daher wird für die gleiche Leistung weniger Chipfläche benötigt. Ob sich dies auch positiv auf die CO_2-Bilanz auswirkt, wurde jedoch bislang kaum erforscht.

Daher untersuchen wir im Rahmen der FMD exemplarisch unseren Prozess zur Herstellung von InP-Heterobipolartransistoren (HBTs). Für jeden einzelnen Prozessschritt ermitteln wir derzeit den Verbrauch an Materialien, Chemikalien und Energie. Das beinhaltet den Stromverbrauch der genutzten Anlagentechnik ebenso wie die Ressourcennutzung der kompletten Reinraum-Infrastruktur. Dabei analysieren wir vor allem die energie- und ressourcenintensivsten Front- und Backend-Prozesse, wie Abscheidungs-, Lithographie-, Nasschemie- und Plasmaprozesse. Die Modellierungen helfen uns zudem, die Stellen besser zu verstehen, an denen die meisten Emissionen entstehen und so die Prozesse zu optimieren. Die Erkenntnisse daraus sollen dann den Vergleich mit herkömmlichen Chips aus Silizium ermöglichen. Erste Ergebnisse haben wir auf der **Green ICT Connect** im Oktober 2024 präsentiert und sind dort auf großes Interesse gestoßen. Die Fachkonferenz beschäftigte sich mit Themen wie umweltbewusster Digitalisierung und nachhaltiger Mikroelektronik.

Inhaltsverzeichnis

Das vom BMBF geförderte **6G Research and Innovation Cluster (6G-RIC)** schafft die wissenschaftlich-technische Basis für die nächste Generation des Mobilfunks (6G) über sämtliche Technologieebenen hinweg, vom Funkzugang bis hin zu den Glasfaser-Transportnetzen, von der Hardware-Ebene über die Protokolle bis hin zu den Anwendungen. Am FBH laufen dazu abteilungsübergreifende F&E-Arbeiten zur Heterointegration von Indiumphosphid (InP)-HBT-Chips auf BiCMOS. Die Kombination beider Technologien ist ein wichtiger Schritt, um die InP-Technologie für kritische Funktionen in 6G-Systemen einzusetzen, wie effiziente Leistungsverstärker zur Erhöhung der Reichweite im sub-Terahertz-Bereich.

Hands-on-Session mit Adam Rämer und dem vom FBH entwickelten Terahertz-Scanner während des Green ICT Camps.

Nachhaltige Technologien im Visier: das erste Green ICT Camp

Ob Videokonferenzen, Streaming oder Cloud-Daten, digitale Inhalte sind heute blitzschnell verfügbar. Das Datenvolumen und mit ihm die Anforderungen an deren Verfügbarkeit wird weiter steigen. Doch wie beeinflussen diese Entwicklungen unsere Ressourcen, den Energieverbrauch und die Ökobilanz? Damit beschäftigten sich 40 Studierende im September 2024 beim ersten **Green ICT Camp,** das im Rahmen der FMD bei uns am Institut stattfand. Die vom BMBF geförderte Veranstaltung bot viele praktische Workshops, Trainings und Exkursionen zu weiteren FMD-Partnern, den Fraunhofer-Instituten HHI und IZM.

Eine Woche lang brachten die Studierenden ihre Perspektiven aus unterschiedlichen Studienrichtungen ein: von Elektrotechnik und Informatik über Umwelttechnik und Ressourcenmanagement bis hin zum Produktdesign. Wolfgang Heinrich, Abteilungsleiter Mikrowellentechnik am FBH und Koordinator des FMD-Hubs „Energiesparende Kommunikationsinfrastrukturen“ zog eine positive Bilanz: „Das Camp hat allen viel Spaß gemacht. Mit der Mischung aus Theorie und Praxis ist es uns gelungen, den Nachwuchskräften bewusst zu machen, dass alle, die Technologien entwickeln, Nachhaltigkeit von Anfang an mitdenken müssen – und zwar über die jeweiligen Fachdisziplinen hinweg.“

greenict.camp24

Inhaltsverzeichnis

E-Beam-Lithografieanlage im FBH-Reinraum des FBH für neuartige Bauelementekonzepte - ermöglicht Strukturierungen bis in den sub-µm-Bereich.

Quantentechnologien und neuromorphes Computing: Enabling-Technologien für neuartige Anwendungen

Als so genannter Deep-Tech-Accelerator bietet das Förderprogramm **QNC Space** Forschungsgruppen, Start-ups und KMU einen niedrigschwelligen Zugang zu technologischer Ausstattung für Entwicklungen im Bereich Quanten- und neuromorphes Computing. Junge Unternehmen und Forschungsgruppen sollen so bestmöglich in ihrer Forschung beziehungsweise auf ihrem unternehmerischen Weg gefördert werden. Eine eigene teure Hightech-Infrastruktur können sie sich in der Regel weder leisten noch wirtschaftlich auslasten bei den anfangs meist geringen Stückzahlen. Im Rahmen von QNC Space erarbeiten sie, gefördert mit bis zu 200.000 Euro, spezifische Prozesse und Prozessmodule bis hin zu Prototypen. Begleitet wird dies durch ein intensives technologisches Beratungs- und Unterstützungsangebot, das die jungen Unternehmen auf weitere Entwicklungsschritte im Markt vorbereitet.

Um die erforderliche technologische Infrastruktur bereitzustellen, hat das FBH einen leistungsfähigen i-Line Waferstepper beschafft. Das vollautomatische Belichtungssystem wird für die fotolithografische Prozessierung benötigt, einen der zentralen Schritte bei der Fertigung von Halbleiterchips. Mit dem neuen ASML-Stepper lassen sich Substratgrößen von 4“, 6“ und 8“ flexibel bearbeiten. Er punktet zudem mit einer besonders hohen Ausrichtungsgenauigkeit und ist dank seiner leistungsfähigen Belichtungsoptik in der Lage, Strukturgrößen bis unter 280 Nanometer zu erzeugen – dies wiederum ermöglicht die Fertigung von optischen Strahlquellen mit präziserer Ausrichtung der Wellenleiter und von Chips mit höherer Grenzfrequenz.

qnc.space

Inhaltsverzeichnis

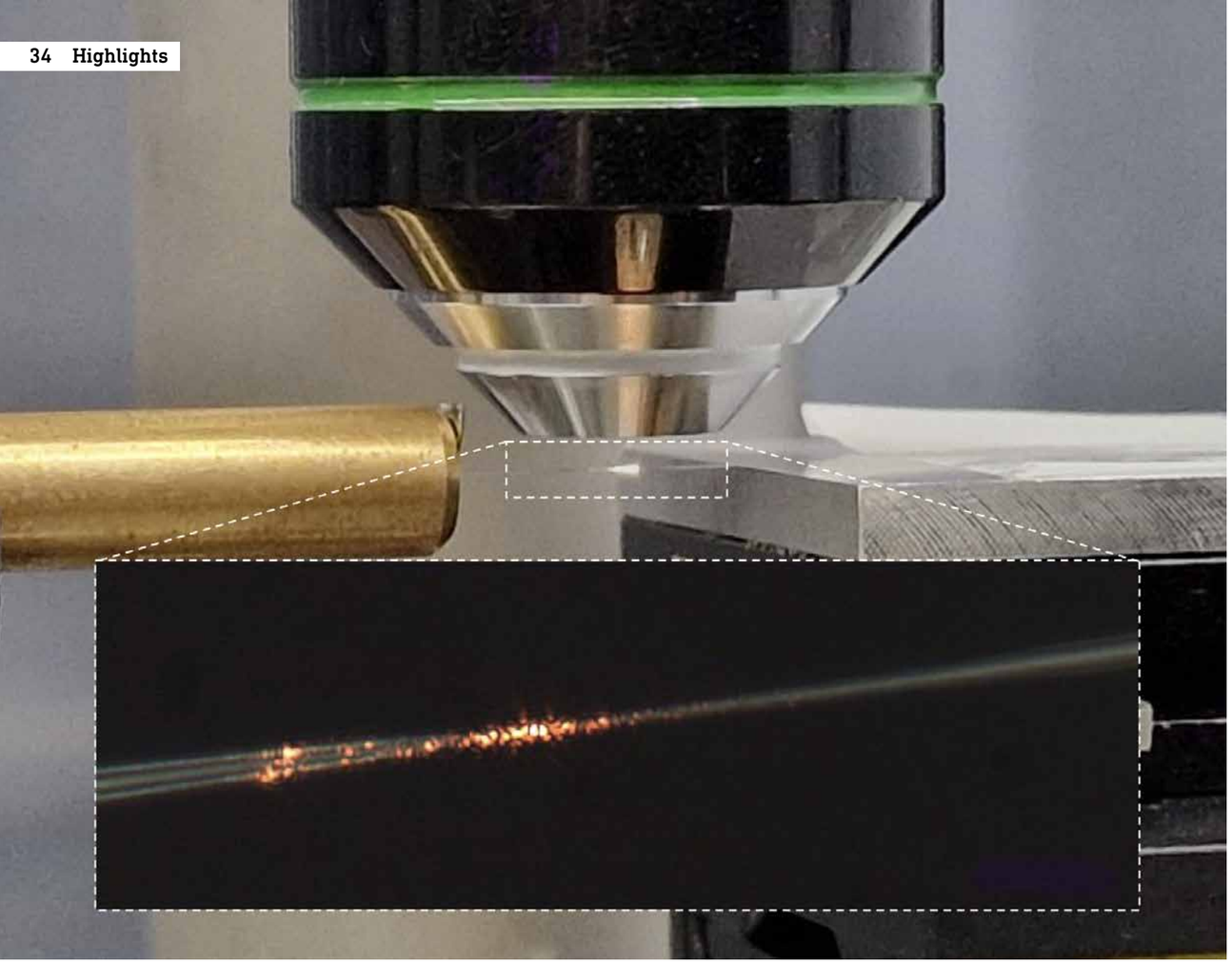


Abb. 1. Test einer zusammenlaufenden („tapered“) Faserspitze zur Übertragung von Licht in eine zweite lichtleitende, ebenfalls „tapered“ Struktur. Die Gesamteffizienz der Übertragung von Faser zu Faser ist höher als 80 %.

Laserquellen und Faser-Chip-Koppler für das Quantencomputing

Wir bringen unser Know-how und unsere Infrastruktur aktuell bei zwei Projekten im Förderprogramm QNC Space ein.

Im Projekt **Cryogenic Fiber to Chip Coupling – CF2CC** entwickeln wir einen integrierbaren Faser-Chip-Koppler, der Effizienzen jenseits von 80 % erreicht (Abb. 1). Dieser Koppler ist eine Schlüsseltechnologie für jegliches photonisches Computing. Er ermöglicht eine besonders effiziente Ankopplung von Computerchips an Fasern und kommt ohne in-situ-Ausrichtung aus. Mit unserem plattformübergreifenden Ansatz sollen künftig kryogene photonisch integrierte Schaltkreise mit optischen Fasern quasi verlustfrei verbunden werden. Eine derartige effiziente Faserkopplung bei kryogenen Temperaturen – und damit bei extremen Minusgraden – ist bislang technologisch nicht zugänglich. Unterstützt werden die Projektziele von der Firma Attocube, die Kryostatsysteme entwickelt und ein kommerzielles Interesse an solch einer Faserkopplung hat.

Im Vorhaben **Barium Laser Systeme für Quantencomputer – BaSyQ** entwickeln wir eine Laserquelle, die speziell auf das Ion Barium zielt (Abb. 2). Das Leichtmetall setzt sich zunehmend gegen konkurrierende Ionen-Kandidaten durch – als bevorzugtes Qubit für den Bereich ionenbasierter Quantencomputer. Bislang fehlen jedoch günstige, stabile, kompakte und skalierbare Laserquellen. Die Wellenlänge 614 Nanometer (nm) stellt eine besondere Herausforderung dar, da hier der Betrieb bei Raumtemperatur aus technologischen Gründen nicht möglich ist. Daher entwickeln wir am FBH eine kompakte Laserquelle bei 614 nm, die auf deutlich unter 0 °C abgekühlt wird. Das Modul wird in ein hermetisch geschlossenes Gehäuse integriert und als Extended-Cavity-Diode-Laser (ECDL) realisiert, bestehend aus einem Halbleiter-Gainchip und einem externen wellenlängenselektiven Element. Die Projektziele werden von der Firma NeQxt unterstützt.

Abb. 2a) Diodenlaser mit orangefarbener Emission, die für diese Wellenlänge typisch ist.

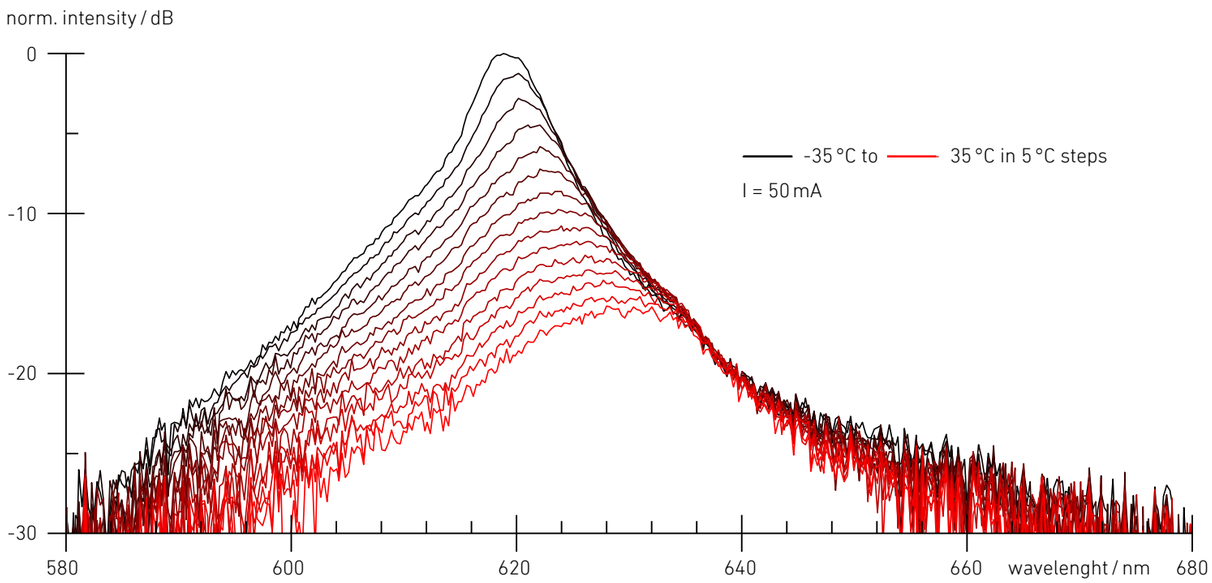


Abb. 2b) Verstärkte spontane Emissionskurven von Chipmaterial für einen Diodenlaser mit externem Resonator, der auf den Bariumionenübergang bei 614 nm abzielt. Die Spitzenposition verschiebt sich von 630 nm bei +35 °C auf 618 nm bei -35 °C.

Inhaltsverzeichnis

Gemeinsam erfolgreich: Leibniz, FMD und Co.

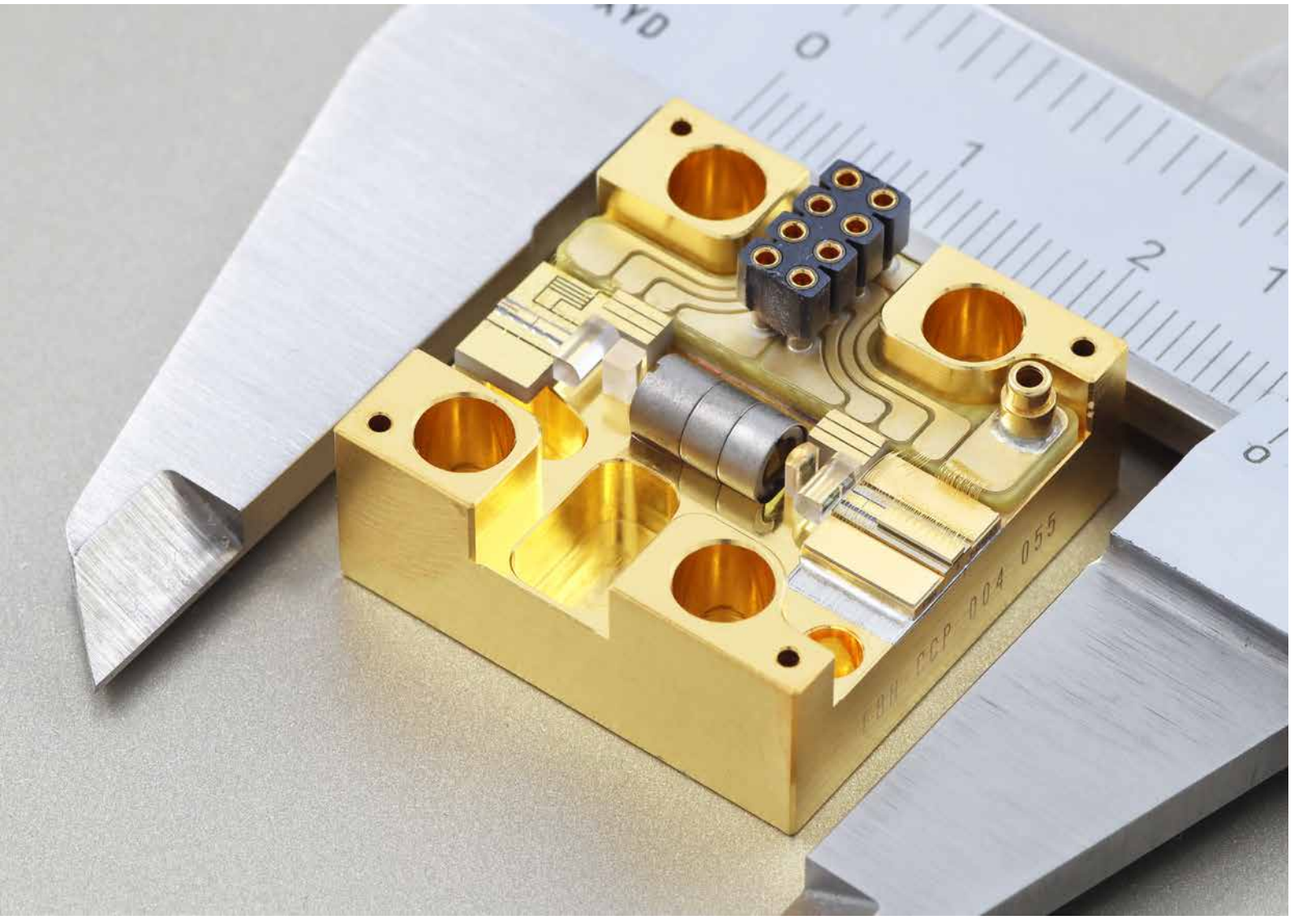
Seit der Gründung des Ferdinand-Braun-Instituts im Jahr 1992 sind wir Mitglied der **Leibniz-Gemeinschaft.** Die Forschungsorganisation vereint 96 eigenständige Forschungseinrichtungen unter einem Dach. Mit mehreren dieser Institute verbindet uns eine langjährige, produktive Zusammenarbeit, deren Expertise die unsere ideal ergänzt. Dazu zählen etwa das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP), das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) und das Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS). Gemeinsam erzielen wir in europäisch und national geförderten Forschungsprojekten exzellente Ergebnisse. Regelmäßig beteiligen wir uns erfolgreich am Leibniz-Wettbewerb, der strategische Ziele der Forschungsorganisation in anspruchsvollen Projekten finanziell fördert. Hier waren wir zuletzt mit unserem Antrag „Far-UVC compact laser module“ – UV-COLA erfolgreich.

Mit Instituten innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft kooperieren wir im Rahmen von Leibniz-Labs, strategischen Verbünden und Forschungsnetzwerken. Seit 2014 sind wir im **Leibniz-Forschungsverbund „Health Technologies“** aktiv, wo wir Lasertechnologien für medizinische Anwendungen entwickeln. Der Verbund aus 14 Forschungseinrichtungen erarbeitet Technologielösungen für drängende medizinische Fragestellungen und vereint Kompetenzen aus verschiedenen Wissenschaftsbereichen, von Photonik und Medizin über Mikroelektronik und Materialforschung bis hin zur Wirtschaftsforschung und angewandten Mathematik. Um das optimale Design von Lasersystemen sicherzustellen und verschiedene Anwendungsszenarien zu modellieren, kooperieren wir mit Partnern im **Leibniz-Forschungsnetzwerk Mathematische Modellierung und Simulation.** Das WIAS beispielsweise hat für mehrere Projekte am FBH die passende Simulationssoftware entwickelt. Wir sind zudem eine von 41 Leibniz-Einrichtungen, die ihre Expertise aus verschiedenen Disziplinen mit Praxiswissen im **Leibniz-Lab Pandemic Preparedness** verknüpft. Ziel des Labs ist es, evidenzbasierte Strategien zu entwickeln, die die Pandemieresilienz von Gesellschaft und Wissenschaft dauerhaft stärken.

Darüber hinaus sind wir in weitere überregionale und regionale Netzwerke eingebunden. So sind wir unter anderem Teil der **Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD)** und an der **APECS-Pilotlinie** im Rahmen des Europäischen Chips-Gesetzes beteiligt (siehe Seite 15). Im **Innovationscampus Elektronik und Mikrosensorik Cottbus – iCampµs,** in enger Zusammenarbeit (unter anderem in zwei Joint Labs) mit der **Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg** sowie weiteren Netzwerken in der Lausitz unterstützen wir mit unseren Forschungsaktivitäten den Strukturwandel in der Region. Wir sind aktiv im **Cluster Optik und Photonik** sowie Mitglied bei **OpTecBB,** dem regionalen Kompetenznetz für Optische Technologien und Mikrosystemtechnik.

Inhaltsverzeichnis

Die **Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)** ist Pulsgeberin für den Strukturwandel in der Lausitz – und eröffnet als Technologietreiberin Perspektiven für Fachkräfte und die Wirtschaftskraft in der Region. Wir unterstützen diesen Prozess im Rahmen des iCampµs-Projektes. Die Kooperation mit der BTU ist langfristig angelegt: Matthias Rudolph (2. von links) wechselte 2009 aus dem FBH auf die Professur für Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik – und arbeitet im Rahmen eines Joint Labs weiter eng mit uns zusammen. 2024 trat Thomas Flisgen (rechts) seine Professur für Theoretische Elektrotechnik an – auch er kommt vom FBH und bald folgte das zweite Joint Lab. Die Verflechtung wird nun weiter verstärkt durch die kürzlich ausgeschriebene, gemeinsame Professur für Terahertz-Komponenten und -Sensorik.



Im Projekt UV-COLA entsteht ein Master Oscillator Power Amplifier, der im blauen Spektralbereich emittiert.

Fern-UVC-Laser für medizinische Anwendungen: UV-COLA erfolgreich im Leibniz-Wettbewerb

Die Entwicklungen in dem 2025 gestarteten Projekt zielen auf eine kompakte Fern-UVC-Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 210 nm. Ziel ist es, diese künftig als mobil einsetzbares medizinisches Gerät im Nasen-Rachen-Raum anzuwenden, um dort Krankheitserreger an Ort und Stelle unschädlich zu machen. Die sogenannte Nasopharynx – der obere Teil des Rachens – ist einer der bevorzugten Lebensräume multiresistenter Keime. Diese können zu einer tödlichen Gefahr für die menschliche Gesundheit werden, da sie mit Antibiotika oft nicht mehr behandelbar sind.

Für die Desinfektion direkt auf Haut sind Lichtquellen im fernen UVC ideal geeignet, da ihre Strahlung nur minimal in die Haut eindringt und sie damit potenziell weniger schädigt als andere UV-Quellen. Eine solche Lichtquelle in Form eines Endoskops, die in Kliniken oder sogar in Privathaushalten eingesetzt werden könnte, würde einen entscheidenden Fortschritt im Bereich der Desinfektion und der Gesundheitsvorsorge bedeuten. Daher entwickeln unsere Forschenden im Projekt neuartige, violett emittierende Laserdioden. Deren Strahlung wird verstärkt und mithilfe eines nichtlinearen Kristalls in den fernen UVC-Spektralbereich frequenzverdoppelt.

UV-COLA baut auf unseren umfassenden Erfahrungen bei der Frequenzverdopplung von Laserstrahlung sowie aus Vorläuferprojekten mit medizinischen Partnern wie der Charité – Universitätsmedizin Berlin auf. Es erweitert und verknüpft die bisherigen Aktivitäten im Kontext der Leibniz-Gemeinschaft.

Inhaltsverzeichnis

Nanosekunden-Pulslaser sind Schlüsselkomponenten für Anwendungen wie Automotive LiDAR. Beim autonomen Fahren emittieren scannende LiDAR-Systeme schnelle Laserpulse. Verkehrsteilnehmende oder Objekte auf der Straße reflektieren diese und werden dadurch erkannt. Für derartige Anwendungen haben wir maßgeschneiderte Laserquellen entwickelt. Diese basieren auf Laserbarren mit bis zu 48 Emittern und einem Wellenleiter, der einen oder mehrere aktive Bereiche mit Tunneldioden enthält. Kombiniert mit den ebenfalls am FBH entwickelten Treibern liefern die Pulsquellen hervorragende Pulsleistungen, kurze optische Pulse, hohe Repetitionsraten und hohe Wirkungsgrade. Damit eignen sie sich ideal für die 3D-Objekterkennung und sind ein exzellentes Beispiel für gebündelte Kompetenzen am FBH.

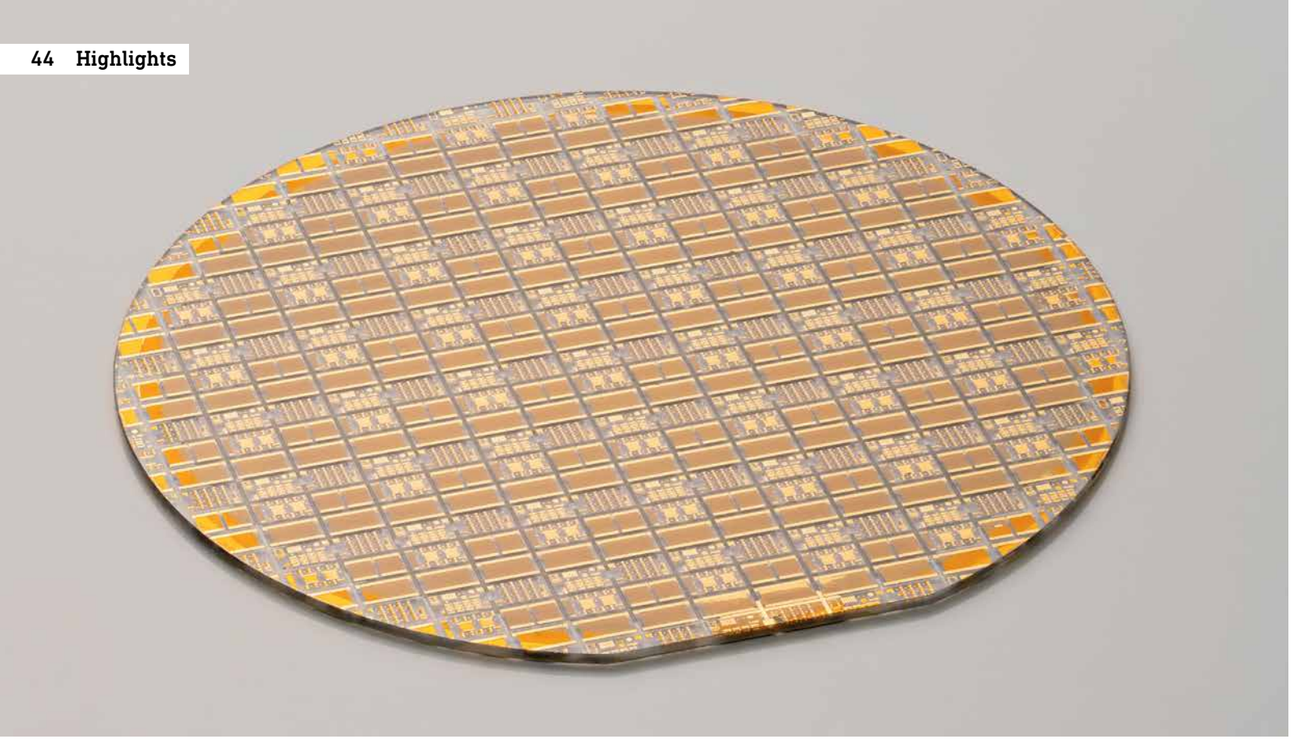
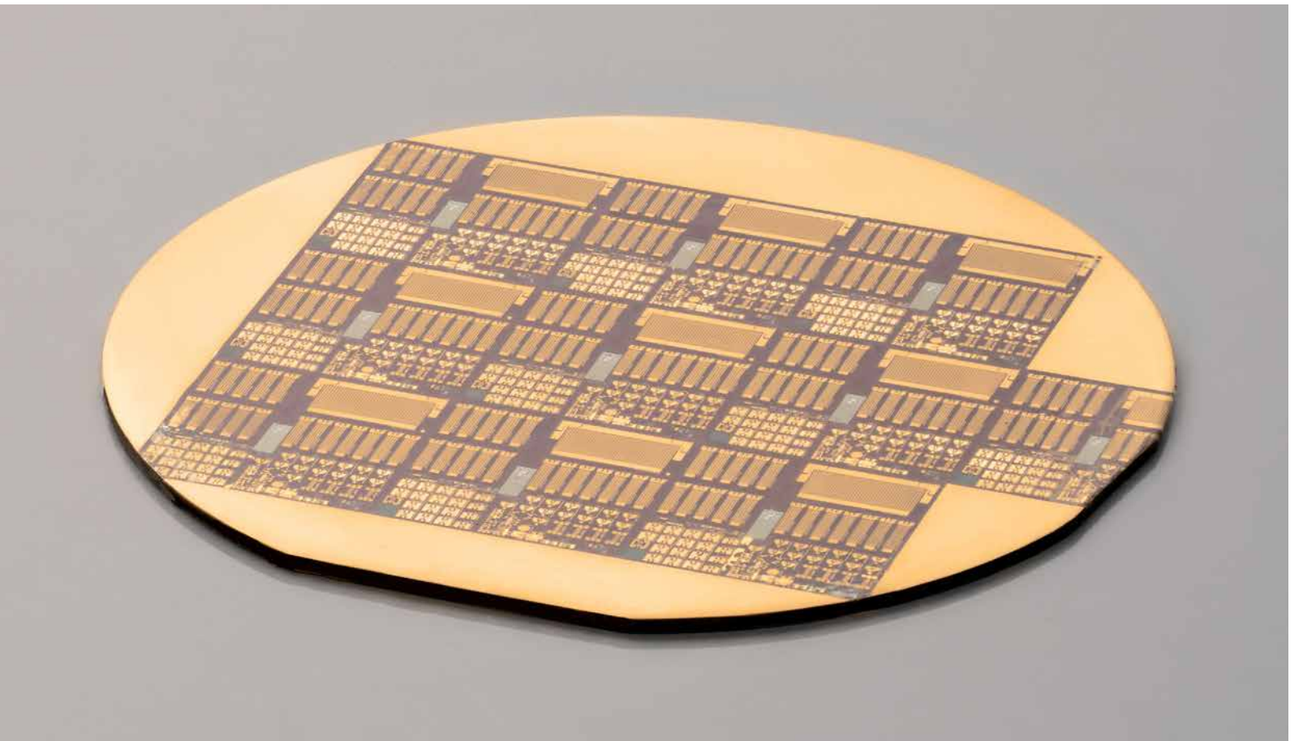


Abb. 1. Vollständig prozessierter 2-Zoll-Galliumoxid-Wafer mit 300 V / 10 A Schalttransistoren.

Abb. 2. 1-Zoll-Aluminiumnitrid-Wafer mit prozessierten Hochspannungstransistoren.



Power durch Partnerschaft – gemeinsam forschen an leistungselektronischen Zukunftsmaterialien

Ultra-wide-bandgap-Halbleitermaterialien wie β-Galliumoxid (β-Ga_2O_3) oder Aluminiumnitrid (AlN) rücken weltweit immer stärker in den Fokus. Ihre besonderen Materialeigenschaften machen sie hochattraktiv für leistungselektronische Anwendungen von morgen. Sie ermöglichen noch kompaktere und effizientere Transistor-Bauelemente mit geringeren Schalt- und Leitungsverlusten als heutige Technologien. Aktuelle Entwicklungen und Fortschritte zeigen klar: Hier entsteht Potenzial für die nächste Technologiegeneration.

Erst kürzlich ist es uns am FBH gelungen, elektrisch aktive Schichten mittels Ionen-Implantation auf einem semi-isolierenden β-Ga_2O_3 2-Zoll-Wafer zu erzeugen (Abb. 1). Deren Eigenschaften sind dabei vergleichbar mit epitaktisch hergestellten Schichten. Wir konnten damit erstmalig laterale Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) mit einer Kanalweite von 92 mm herstellen. Diese MOSFETs mit einem Durchlasswiderstand weit unterhalb 1 Ω erlauben Ströme von bis zu 18 A – ein neuer Rekordwert.

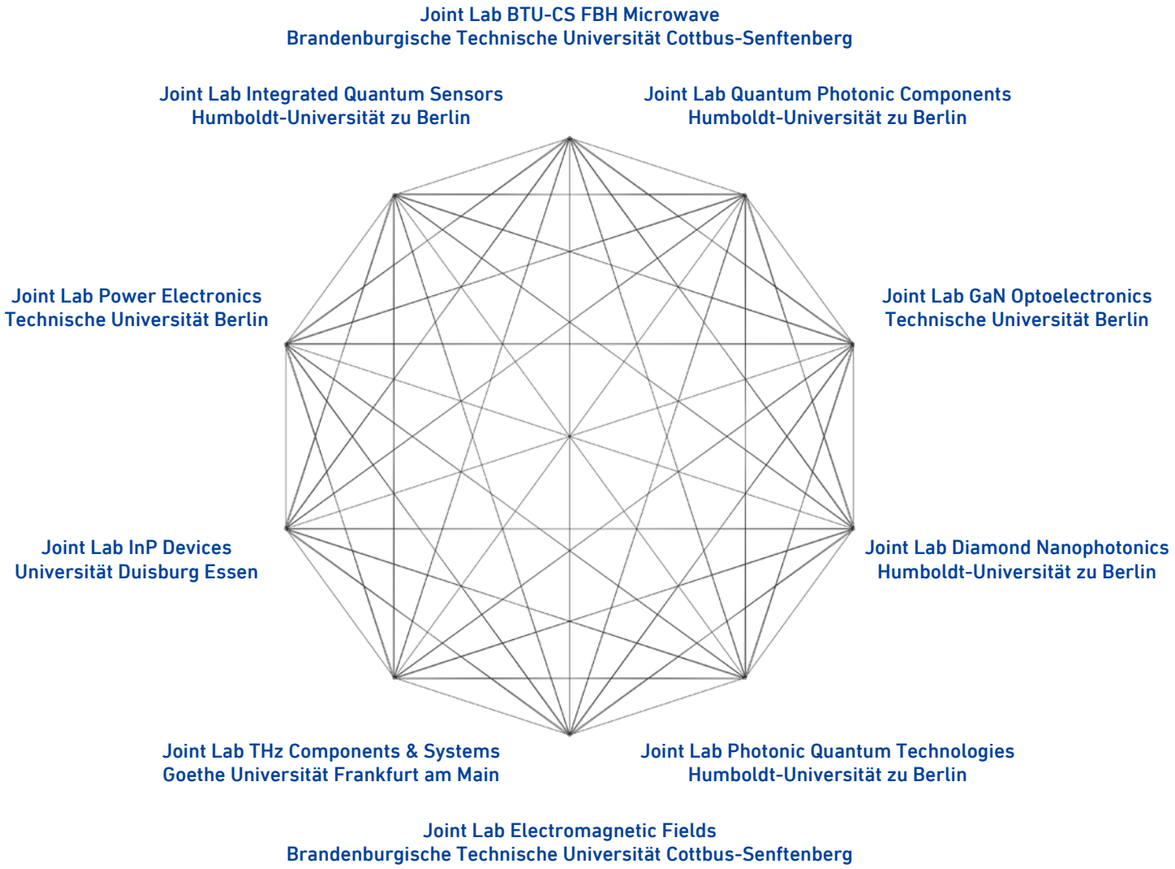
Diese vielversprechenden Ergebnisse bauen auf der langjährigen Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ). auf. Bereits seit 2015 kooperieren wir bei Ga_2O_3-basierten Bauelementen für leistungselektronische Anwendungen. Während das IKZ seine Expertise bei der Materialentwicklung einbringt – insbesondere der Volumenkristallzüchtung und Epitaxie zur Herstellung von β-Ga_2O_3-Epitaxie-Wafern – entwickeln wir darauf aufbauend die passenden Prozesse für leistungselektronische Bauelemente. Bereits 2017 konnten wir so erfolgreich einen ersten lateralen MOSFET herstellen.

Durch weitere Material- und Prozessoptimierungen setzten wir mit einem demonstrierten Rekordwert von 155 MW / cm^2 Leistungsdichte im Jahr 2019 neue Maßstäbe für β-Ga_2O_3-MOSFETs. Dieser Meilenstein unterstreicht unsere weltweite Vorreiterrolle in der β-Ga_2O_3-Technologie. Bereits ein Jahr später konnten wir Schalttransienten bei bis zu 400 V an hart schaltenden β-Ga_2O_3 MOSFETs demonstrieren – und halten bis heute den Weltrekord in diesem Bereich.

Parallel zu den Fortschritten bei lateralen β-Ga_2O_3-Leistungsbauelementen starteten wir 2020 Forschungsaktivitäten, um vertikale Finnen-Feldeffekt-Transistoren (FinFETs) zu entwickeln. Durch die enge und komplementäre Zusammenarbeit mit dem IKZ erzielten wir erneut bedeutende Erfolge. Gemeinsam treiben wir auch künftig die Entwicklung lateraler und vertikaler β-Ga_2O_3-Leistungsbauelemente weiter voran. Unsere gemeinsamen Erfolge bei β-Ga_2O_3 haben wir in über zehn referierten Publikationen und zahlreichen Konferenzbeiträgen dokumentiert. Die F&E-Aktivitäten zu diesem Leistungshalbleitermaterial hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den Projekten OXIKON und GoNext gefördert.

Mittlerweile kooperieren wir auch bei Hochspannungstransistoren auf AlN-Basis – für zukünftige Leistungskonverter mit noch höherer Leistungsdichte (Abb. 2). Auf AlN-Substraten des IKZ haben wir Transistoren mit 1700 V Durchbruchspannung realisiert und damit 600 V / 1 A Schalttransiente demonstriert.

Inhaltsverzeichnis



Grundlagenforschung und Anwendung verbinden – Erfolgsmodell Joint Labs

Ende 2024 ist am FBH das inzwischen zehnte Joint Lab gestartet, das die Grundlagenforschung von Forschenden verschiedener Hochschulen und Universitäten mit unserer anwendungsorientierten F&E verbindet. Im **Joint Lab Electromagnetic Fields** kooperieren wir eng mit Thomas Flisgen, Professor für Theoretische Elektrotechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU-CS). Wir freuen uns auf die weitere enge Zusammenarbeit mit ihm. Thomas Flisgen war vor seiner Berufung an die BTU-CS im Herbst 2024 viele Jahre als Gruppenleiter für Elektromagnetische Simulation am FBH tätig. Im Joint Lab Electromagnetic Fields werden elektromagnetische Feldberechnungen durchgeführt und numerische Analyse- und Simulationsmethoden entwickelt. Damit sollen vor allem anwendungsnahe Fragestellungen beantwortet werden. Besondere Schwerpunkte liegen auf der Modellierung von Bauelementen für die Hochfrequenztechnik sowie auf der Feldmodellierung für Systeme aus der Quantentechnologie.

Hervorragende Nachrichten gibt es aus dem **Joint Lab Diamond Nanophotonics** mit der Humboldt-Universität zu Berlin, das von Tim Schröder, Professor für Integrierte Quantenphotonik seit 2018 geleitet wird: Ende 2024 erhielt Tim Schröder einen Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrats (ERC). Die ERC Grants zählen zu den bedeutendsten Auszeichnungen in der europäischen Forschungsförderung und werden für herausragende wissenschaftliche Leistungen vergeben. Gefördert wird das Forschungsprojekt HyperGraph (Multidimensional Hyperentangled Photon Graph States) fünf Jahre lang mit etwa 2,5 Millionen Euro. Herzlichen Glückwunsch!

Mehr über unsere Joint Labs.

Inhaltsverzeichnis

Die Kolleginnen aus unserer **Personalabteilung** kümmern sich um sämtliche Personalangelegenheiten der rund 400 Beschäftigten: von der Rekrutierung neuer Fachkräfte über Maßnahmen zur Personalentwicklung bis hin zum Controlling personalbezogener Verfahren und Prozesse. Allein im Jahr 2024 wurden in der Personalbetreuung circa 270 Vorgänge bearbeitet, darunter Einstellungsverfahren, Austritte von Mitarbeitenden und die Hochrechnung von Personalkosten. Neue Weiterbildungsformate wie das Führungskräfteseminar und Schulungen für Beschäftigte wurden entwickelt. Über Umfragen wurde aktiv Feedback der Mitarbeitenden eingeholt und die Digitalisierung im Personalbereich weiter vorangetrieben. Zum Aufgabenbereich gehören zudem das betriebliche Gesundheitsmanagement und die Dienstreisen – mit mehr als 320 Anträgen und den sich daran anschließenden Abrechnungen.

Besondere Momente, Besuche und internationale Vernetzung

Das FBH arbeitet regional, national und international seit vielen Jahren eng mit Partnern aus Forschung und Industrie zusammen. Bei den Firmen reicht die Spanne von Start-ups, kleinen und mittelständischen Unternehmen bis hin zu großen Playern. Dies belegen die mehr als 160 Drittmittelprojekte und Forschungsaufträge, die wir 2024 gemeinsam bearbeitet haben.

Patrick Scheele (r.) überreicht Ina Czyborra ein Gastgeschenk anlässlich der Sommertour des Senats.

Auch von politischer Seite war das Interesse groß. Im August 2024 durften wir Berlins Wissenschaftssenatorin **Ina Czyborra** und Staatssekretär Henry Marx mit weiteren Kolleginnen und Kollegen bei uns begrüßen. Im Rahmen der Sommertour der **Senatsverwaltung für Wissenschaft, Gesundheit und Pflege** hatten wir die tolle Möglichkeit, unsere Forschung am Wissenschaftsstandort Adlershof vorzustellen.

Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier bei seinem Besuch an der BTU Cottbus-Senftenberg.

Während seiner Informations- und Begegnungsreise hat **Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier** im Juni 2024 die Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) am Standort Cottbus besucht. Er reiste gemeinsam mit dem Diplomatischen Korps und dem Brandenburgischen Ministerpräsidenten Dietmar Woidtke. Im Kontext des **Strukturwandelprojektes „iCampµs“** in der Lausitz stellten wir unser neuartiges portables Raman-Sensorsystem vor.

Delegation aus dem Bundeskanzleramt bei ihrer Laborbesichtigung am FBH.

Im Dezember 2024 hatten wir die spannende Gelegenheit, uns mit einer **Delegation des Referats 621 (Grundsatzfragen der Digitalpolitik) aus dem Bundeskanzleramt** über aktuelle und zukünftige Anwendungen von Quantentechnologien, insbesondere der Quantensensorik, auszutauschen. Wie solche Sensoren entstehen, konnten wir in unserem Joint Lab Integrated Quantum Sensors direkt vorführen.

Inhaltsverzeichnis

Hochrangiges Arbeitstreffen am FBH, bei dem das Konzept für ein quantenbasiertes Gravitationsgradiometer diskutiert wurde.

v.l.n.r: Patrick Scheele, Karin-Irene Eiermann, Arif Havas Oegroseno.

Auf internationaler Ebene …

gab es im vergangenen Jahr verschiedene Forschungsaufenthalte, Besuche von Gastwissenschaftler*innen und hochrangig angesiedelte Meetings.

Im Bereich der **Weltraumanwendungen** laufen seit vielen Jahren **nationale und internationale Kooperationen** am FBH. Missionen wie etwa MAIUS mit Quantenexperimenten an Bord wurden auch dank unserer robusten Lasermodule erfolgreich durchgeführt. Arbeitstreffen gab es unter anderem mit dem NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Im Rahmen der deutsch-amerikanischen BECCAL-Kooperation liefert das FBH 55 Lasermodule für Experimente mit ultrakalten Atomen und Bose-Einstein-Kondensaten auf der Internationalen Raumstation ISS.

Im Juni waren wir zudem Gastgeber für ein Arbeitstreffen mit der US-Raumfahrtbehörde NASA, dem JPL, dem Goddard Space Flight Center der NASA, der Airbus Defence & Space, der University of Texas at Austin, dem DLR sowie dem GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung. Bei dem Meeting ging es um die Konzeption eines quantenbasierten Gravitationsgradiometers für den potenziellen Einsatz auf einem Erdbeobachtungssatelliten.

In der Materialtechnologie gibt es ein gemeinsames Projekt mit der Gruppe von Markus Pristovsek von der Nagoya University, Institut IMaSS des Nobelpreisträgers von 2014 Hiroshi Amano, in Japan zum **Wachstum des neuen Verbindungshalbleiters Aluminium-Phoshor-Nitrid** (AlPN). Unsere Aktivitäten werden dabei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt, jene in Nagoya von der Japan Science and Technology Agency (JST) im Rahmen des „Advanced Technologies for Carbon-Neutral"-Programms. Markus Weyers, Abteilungsleiter der FBH-Materialtechnologie, verbrachte daher ab Anfang Oktober 2024 zehn Wochen vor Ort in Japan. Ziel des Forschungsaufenthalts war es, das jeweilige Leistungsspektrum besser kennenzulernen, das gemeinsame Projekt voranzubringen und weitere Kooperationsmöglichkeiten auszuloten.

Im RF Power Lab gibt es seit mehreren Jahren einen engen Austausch mit Gian Piero Gibiino von der Università di Bologna zum Thema **Mikrowellen-Messtechnik und Schaltungsdesign** – nicht nur inhaltlich, sondern auch personell. So haben inzwischen zwei Doktoranden aus Bologna einen Teil ihrer Forschungen für die Promotion in Italien bei uns am Institut durchgeführt. Ein weiterer Student kam für seine Masterarbeit an das FBH und ist geblieben: Im April 2024 hat er seine Promotion bei uns am Institut begonnen. Ergebnisse aus dieser Kooperation wurden unter anderem auf Konferenzen wie der European Microwave Week präsentiert, in wissenschaftlichen Publikationen, Workshops und Short Courses. Weitere Aktivitäten werden aktuell vorbereitet.

Aus Asien besuchten uns 2024 gleich mehrere Delegationen. Im Juni tauschten wir uns mit Vertreter*innen aus Forschungseinrichtungen, Universitäten, Ministerien, der Botschaft und des Konsulats aus Indonesien aus, um **Kooperationsmöglichkeiten im Bereich der Halbleitertechnologie und bei Abschlussarbeiten,** vom Bachelor bis hin zur Promotion, auszuloten. Die Absichtserklärung, die wir mit der Regierung der Republik Indonesien, vertreten durch Botschafter Arif Havas Oegroseno, unterzeichnet haben, unterstreicht den Willen zur engen Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Neysha Lobo Ploch, Leiterin des Entwicklungs-Zentrums am FBH, bei ihrer Präsentation.

Adlershofer Kampagnenmotiv für Toleranz und Vielfalt.

FBH-Teams, die am Adlershofer Firmenstaffellauf 2024 teilnahmen.

Eine Delegation des Institute of Nano Optoelectronics Research and Technology (INOR) der Universiti Sains Malaysia war im September 2024 bei uns zu Gast. Gegenstand des Austauschs war eine Kollaboration im Bereich der Gruppe-III-Nitrid-Epitaxie. Zuvor hatte sich die malaysische Professorin Norzaini Zainal im Rahmen eines Stipendiums der Alexander von Humboldt-Stiftung bereits mehrmals zu mehrmonatigen Forschungsaufenthalten am FBH aufgehalten.

Ebenfalls auf der Suche nach Möglichkeiten der Zusammenarbeit war eine Delegation des taiwanischen Wissenschaftsministers Wu Cheng-wen im Bundesministerium für Bildung und Forschung. Patrick Scheele nahm an dem Treffen im September 2024 mit der damaligen Bundesforschungsministerin Bettina Stark-Watzinger teil, in dem es unter anderem um die **Zusammenarbeit im Bereich Halbleiter** ging.

Mit Taiwan arbeiten wir bereits seit mehreren Jahren gemeinsam an der Entwicklung von **leistungselektronischen und Mikrowellen-Bauelementen auf Basis von Galliumnitrid** (GaN). Zuletzt reiste Joachim Würfl aus dem FBH im Rahmen des DAAD - NSTC (National Science and Technology Council) Austauschprojekts Kaleo (High power Ka-band transceiver module with improved heat management using AlN-based interposer technology for LEO applications) auf die ostasiatische Insel, wo er an der National Yang Ming Chao Tung Universität (NYCU) zwei Tutorials zu breitlückigen Halbleiter-Bauelementen hielt.

Im Dezember 2024 empfingen wir eine Delegation der Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer sowie Rektor*innen und Forschungsmanager*innen der Universitäten von Danzig, Malta und Split und des Central European Research Infrastructure Consortiums. Im Mittelpunkt des Besuchs stand unser EntwicklungsZentrum für den Prototypenbau, mit dem wir **exzellente Forschungsergebnisse noch schneller in marktorientierte Produkte überführen.**

…und das gab es sonst noch zu berichten

Besonders stolz sind wir darauf, dass wir zum sechsten Mal das **TOTAL E-QUALITY Prädikat** für chancengleichheitsorientierte Personal- und Organisationspolitik erhalten haben. Ein besonderes Highlight: Trotz sinkender Bewerber*innenzahlen ist der Anteil weiblicher Fach- und Führungskräfte bei uns weiter gestiegen – insbesondere in Führungspositionen.

Da uns gelebte Vielfalt wichtig ist, unterstützen wir die im Juli 2024 gestartete Standortkampagne des Technologieparks Adlershof, die sich unter dem Motto „35.000 Menschen, 35.000 Geschichten. Ein Ziel: Weltoffen die Zukunft gestalten“ für **Toleranz und Vielfalt** einsetzt. Ebenso haben wir uns zusammen mit rund 700 Unternehmen, Stiftungen, Verbänden, Hochschulen und NGOs der Initiative #Zusammenland angeschlossen, die von führenden deutschen Medien ins Leben gerufen wurde. Ziel der Kampagne ist es, gemeinsam Haltung für Vielfalt und Demokratie zu zeigen.

Möglichkeiten zum **Austausch untereinander** gab es ebenfalls: in bester Stimmung beim alljährlichen Sommerfest und mit sportlichem Ehrgeiz beim 12. Adlershofer Firmenstaffellauf, an dem 2024 gleich sechs Laufteams von uns teilnahmen.

Inhaltsverzeichnis

Forschung – Ergebnisse & Entwicklungen

Inhaltsverzeichnis

Das Ferdinand-Braun-Institut organisiert seine F&E-Aktivitäten im Rahmen von Labs und Departments in vier Forschungsfeldern

III/V-Technologie

Der Forschungsbereich III/V-Technologie ist das technologische Rückgrat unseres Instituts, das umfassende Expertise mit einer hochmodernen Reinraum- und Laborinfrastruktur verbindet. Unsere Kompetenzen reichen von der Epitaxie von Nitriden und Arseniden bis zur Prozessierung einer breiten Palette von Bauelementen und Materialien. Wir montieren und bauen unsere Bauelemente so auf, dass sie sich nahtlos in Module und Systeme integrieren lassen. Sämtliche Entwicklungen werden durch umfangreiche Analysen und Zuverlässigkeitstests begleitet. Dieses breit gefächerte Kompetenzspektrum bildet die Grundlage für unsere Innovationen in den Bereichen Photonik, III/V-Elektronik und Integrierten Quantentechnologien.

Erfahren Sie mehr über unsere Entwicklungen in diesem Bereich.

Photonik

In unserem Forschungsbereich Photonik decken wir ein breites Spektrum an Entwicklungen bei Diodenlasern und Leuchtdioden (LED) ab, die präzise auf spezifische Anforderungen zugeschnitten sind. Das Portfolio reicht von der Erforschung fundamentaler Leistungsbegrenzungen bis hin zur Entwicklung von einsatzfähigen Modulen, Prototypen und Systemen. Es umfasst Diodenlaser auf Gallium-Arsenid-Basis (620 - 1180 nm) und Module, die vom nahen Infrarot bis in den sichtbaren Spektralbereich emittieren. Wir realisieren zudem Module, die die Emission dieser Bauelemente in den ultravioletten (UV) Spektralbereich konvertieren. Außerdem entwickeln wir Laserdioden und LEDs auf der Basis von Galliumnitrid mit direkter Emission im UV- und violetten Spektralbereich. Aktuelle Ergebnisse finden Sie ab Seite 61.

Erfahren Sie mehr über unsere Entwicklungen in diesem Bereich.

Integrierte Quantentechnologie

Unsere F&E-Aktivitäten im Forschungsbereich Integrierte Quantentechnologie zielen darauf, Quantentechnologien (QT) von Proof-of-Concept-Demonstratoren aus dem quantenoptischen Labor in industrielle Anwendungen zu überführen. Dies ebnet den Weg für die zweite Quantenrevolution – damit die QT ihr volles Potenzial für die Gesellschaft von morgen entfalten kann. Zu den Anwendungen gehören Quantensensorik, Quantenkommunikation und Quantencomputer, die sowohl im Labor als auch im Weltraum eingesetzt werden können. Aktuelle Ergebnisse finden Sie ab Seite 73.

Erfahren Sie mehr über unsere Entwicklungen in diesem Bereich.

III/V-Elektronik

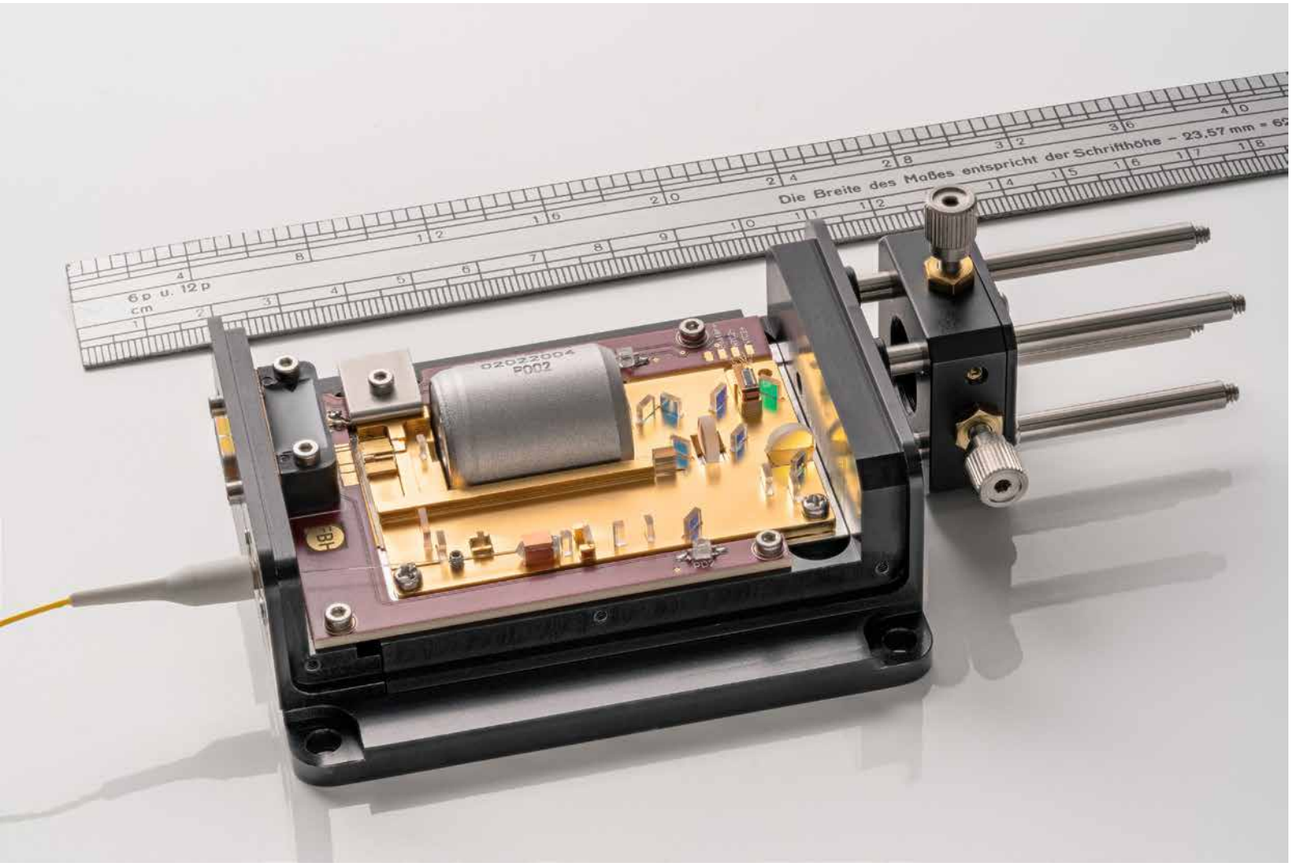
Das übergeordnete Ziel unserer Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der III/V-Elektronik ist es, die Leistungsgrenzen elektronischer Bauelemente im Hinblick auf eine effiziente Leistungserzeugung zu verschieben: bei hohen Frequenzen, hohen Spannungen und kurzen Schaltzeiten. Das Frequenzspektrum reicht von der Hochgeschwindigkeits-Leistungselektronik über die Mobilfunkbänder im unteren GHz-Bereich bis hin zu Submillimeterwellen. Wir bieten neuartige Lösungen für den stetig wachsenden Bedarf an drahtloser Kommunikation (5G, 6G, ...), Radarsensorik sowie an effizienten Leistungswandlern. Durch verbesserte Energieeffizienz wollen wir den Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen technischer Systeme deutlich senken. Aktuelle Ergebnisse finden Sie ab Seite 85.

Erfahren Sie mehr über unsere Entwicklungen in diesem Bereich.

Inhaltsverzeichnis

Photonik

Inhaltsverzeichnis



Quantenlichtmodul mit integriertem Pumplaser, optischem Isolator, nichtlinearem SPDC-Kristall, gefaltetem Referenzpfad und weiteren mikrooptischen Komponenten sowie extern angebrachten MIR-Optiken und einer optischen Faser zum NIR-Spektrometer.

Quantenlichtmodule für hochentwickelte Sensoriksysteme

Das Ferdinand-Braun-Institut ist führend in der Entwicklung von miniaturisierten Quantenlichtmodulen, die sich nahtlos in hyperspektrale Bildgebungs- und optische Kohärenztomographiesysteme im mittleren Infrarot (MIR) integrieren lassen. Die Module nutzen die einzigartigen Eigenschaften verschränkter Photonen, um Informationen, die im MIR-Spektralbereich entstehen, im nahen Infrarotbereich (NIR) zu detektieren. Dadurch wird es möglich, Messungen mit konventionellen, siliziumbasierten Spektrometern durchzuführen. Dieser innovative Ansatz schafft die Voraussetzungen für schnelle und effiziente Sensoranwendungen – etwa für die präzise Krebsdiagnostik im Reagenzglas (in vitro) oder für den zuverlässigen Nachweis von Mikroplastik im Abwasser.

In unseren Modulen wird das intensive Pumplicht eines Lasers gezielt auf einen periodisch gepolten Kaliumtitanylphosphat-Kristall (PPKTP) gerichtet. Dabei entstehen durch parametrische Fluoreszenz (SPDC) verschränkte MIR-NIR-Photonenpaare. Die MIR-Photonen haben Wellenlängen im Bereich von 3,3 bis 10 µm, der für die Spektroskopie sehr interessant, aber messtechnisch nur schwer zugänglich ist. Die NIR-Photonen im Bereich von 780 bis 930 nm sind wiederum sehr einfach zu detektieren. Die verschränkten MIR-NIR-Photonenpaare werden kollinear mit dem Pumplicht aus dem Kristall emittiert. Anschließend trennt ein dichroitischer Spiegel die MIR-Photonen ab und lenkt sie gezielt zur Probe. Dort wechselwirken sie mit dem Material, während die NIR-Photonen und das Pumplicht eine Referenzstrecke innerhalb des Moduls durchlaufen.

Nachdem das MIR-Licht mit der Probe interagiert hat, gelangen rückgestreute MIR-Photonen auf demselben Pfad ein zweites Mal in den PPKTP-Kristall und werden dort mit dem gleichzeitig zurückgekehrten Referenzlicht überlagert. Hierbei interferieren dann alle Wellenlängen analog zu einem Michelson-Interferometer. Aufgrund der Verschränkung der Photonenpaare tragen danach nicht nur die MIR-Photonen die Interferenzinformation, sondern auch die NIR-Photonen. Die Quanteninterferenz der NIR-Photonen lässt sich dann durch Spektrometer mit konventionellen Silizium-Detektoren nachweisen, während die MIR-Photonen dabei nicht erfasst werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für effektive SPDC ist ein leistungsstarker ($P \geq 1\,W$), hochkohärenter ($l_c \geq 1\,m$) Laser mit einer bestimmten Emissionswellenlänge. Dafür haben wir erfolgreich Single-Mode-Diodenlaser mit Bragg-Spiegel (DBR) entwickelt, die bei 660, 720 und 1170 nm emittieren. Derartige Laserquellen waren bislang nicht verfügbar und sind für unser Verfahren zur Erzeugung von verschränktem Quantenlicht unverzichtbar.

Die Integration eines hochentwickelten interferometrischen Aufbaus in ein kompaktes Modul eröffnet auch neue Anwendungen. Die weitere Miniaturisierung und höhere Leistungsfähigkeit der Quantenlichtmodule bieten ein enormes Potenzial, um Technologien weiterzuentwickeln – ob in der biomedizinischen Bildgebung, der Umweltsensorik oder anderen Bereichen, die eine präzise quantenverstärkte Detektion erfordern. Außerdem lässt sich die Diodenlaser-Pumpquelle nahtlos in das interferometrische Modul integrieren. Insgesamt markieren unsere neuartigen Laserquellen und das kompakte Design der Quantenlichtmodule einen bedeutenden technologischen Fortschritt, der neue Maßstäbe in der Quantenoptik und Quantenbildgebung setzt.

Die Forschungsarbeiten werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den Projekten QUIN (FKZ 13N15403), Sim-QPla (FKZ 13N15943) und QEED (FKZ 13N16381) unterstützt.

Publikationen

[1] G. Blume, O. Matalla, H. Wenzel, A. Maaßdorf, D. Feise, J. Fricke, P. Ressel, S. Kreutzmann, A. Ginolas, A. Sahm, A. Knigge, K. Paschke, "Single mode 660 nm DBR tapered laser with 1 W optical output power", Proc. of SPIE, vol. 12402, 1240205 (2023).

[2] F. Mauerhoff, P. Hildenstein, A. Maaßdorf, D. Feise, N. Werner, J. Glaab, G. Blume, K. Paschke, "GaAs Based Edge Emitters at 626 nm, 725 nm and 1180 nm", in IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 31 (2), 1500710 (2025).

[3] N. Werner, S.-A. Seeger, F. Mauerhoff, P. Hildenstein, A. Maaßdorf, G. Blume, D. Feise, H. Wenzel, K. Paschke, "High-power semiconductor laser systems at 720 nm: tailored laser light delivery for quantum technologies", Proc. of SPIE Photonics West (2025).

[4] P. Hildenstein, G. Blume, N. Werner, D. Feise, A. Shwerwani, E. Pearce, B. Kemper, A. Barroso, J. Schnekenburger, S. Ramelow, K. Paschke, "Efficient MIR sensing with undetected photons: High brightness, miniaturized SPDC module for real world applications", Proc. of SPIE Photonics West (2025).

[5] G. Blume, D. Feise, A. Sahm, P. Hildenstein, N. Werner, J. Zender, F. Wendt, F. Gewers, E. Pearce, S. Ramelow, K. Paschke, "Long wavelength, small quantum interferometer module: shrinking MIR OCT systems via quantum entanglement", Proc. of SPIE Photonics West (2025).

Inhaltsverzeichnis

Abb. 1. Der Raman-Messkopf des tragbaren SERDS-Sensorsystems wird zur Analyse direkt in eine Milchprobe eingetaucht.

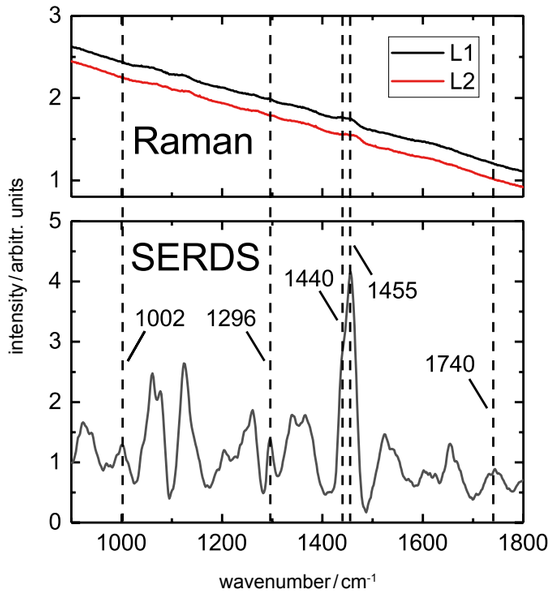


Abb. 2. Gemittelte Raman-Spektren von Heidelbeerjoghurt mit 2,8 g / 100 g Fettgehalt, angeregt mit L1 und L2 (o.) und entsprechendes SERDS-Spektrum (u.), P_{ex} = 25 mW, t = 30 x 1 s.

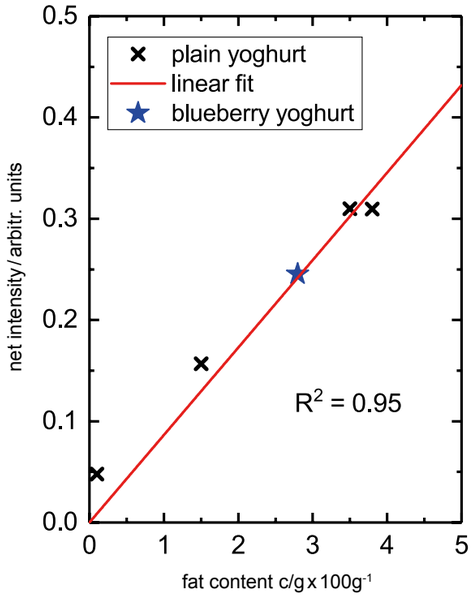


Abb. 3. Netto-SERDS-Intensitäten, abgeleitet aus dem Raman-Signal bei 1740 cm^{-1}, für Natur- und Heidelbeerjoghurtproben in Abhängigkeit von dem vom Hersteller angegebenen Fettgehalt.

Milchanalyse neu gedacht – mit Diodenlaser-basierter Raman-Spektroskopie

Milch und Milchprodukte spielen eine wichtige Rolle für die weltweite Ernährung und den Handel. Um eine hohe Produktqualität, Sicherheit und effiziente Produktionsprozesse zu gewährleisten, sind zuverlässige Methoden zur Lebensmittelkontrolle unerlässlich. Die Raman-Spektroskopie liefert molekulare Fingerabdrücke für die qualitative und quantitative Analyse. Die schwachen Raman-Signale werden jedoch häufig durch Hintergrundsignale wie Fluoreszenz oder Umgebungslicht überdeckt. Optisch trübe Proben, wie Milch und andere Milchprodukte, erschweren zusätzlich den Zugang für optische Sensoren.

Mit der Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS) hingegen lassen sich Raman- und Hintergrundsignale effizient voneinander trennen – ein physikalischer Ansatz, der gezielt gegen Störeinflüsse wirkt. SERDS nutzt zwei Laserlinien mit leicht unterschiedlicher Wellenlänge, um nacheinander zwei Raman-Spektren aufzunehmen. Während sich die Raman-Linien mit der Laserwellenlänge verschieben, bleiben Hintergrundsignale davon unberührt. Durch Subtraktion der beiden Spektren lassen sich die gewünschten Raman-Signale gezielt trennen und anschließend auswerten.

Als Anregungslichtquellen für SERDS haben wir Diodenlaser entwickelt und gefertigt, die alternierend zwei Wellenlängen aus einem Chip bei 785 nm emittieren. Diese Bauelemente liefern schmalbandiges Laserlicht über den gesamten Betriebsbereich mit einem spektralen Abstand zwischen den beiden Laserlinien L1 und L2 von etwa 0,6 nm (10 cm^{-1}) bei einer optischen Leistung von bis zu 150 mW. Dank ihrer kompakten Bauweise und ihres geringen Energieverbrauchs lassen sie sich leicht in tragbare, batteriebetriebene Sensorsysteme integrieren. Die Eignung solcher in unserem Institut entwickelten Sensorsysteme mit integrierten Diodenlasern für SERDS haben wir sowohl im Labor als auch bei Vor-Ort-Untersuchungen erfolgreich demonstriert.

Um potenzielle Anwendungsfelder zu erkunden, haben wir in ersten Raman-Pilotexperimenten exemplarisch Proben von Kuhmilch und Joghurt untersucht. Dafür haben wir Milch- und Naturjoghurtproben mit unterschiedlichem Fettgehalt aus dem Einzelhandel bezogen. Ergänzend wählten wir auch Fruchtjoghurts – etwa mit Heidelbeere – für die Messungen aus. Diese enthalten natürliche Farbpigmente in der Fruchtzubereitung, die zu laserinduzierter Fluoreszenz führen und Raman-Messungen zusätzlich erschweren. In unseren Experimenten tauchten wir den Messkopf direkt in die jeweilige Probe ein – ohne vorherige Probenvorbereitung, siehe Abb. 1.

Abb. 2 zeigt exemplarisch zwei Raman-Spektren eines Heidelbeerjoghurts mit einem Fettgehalt von 2,8 g / 100 g. Die Probe wurde abwechselnd mit den beiden Laserlinien angeregt – bei einer Anregungsleistung von 25 mW und einer Belichtungszeit von jeweils 1 Sekunde. Die dargestellten Raman-Spektren beruhen auf durchschnittlich 30 Einzelmessungen und wurden zur besseren Übersicht vertikal versetzt dargestellt. Ein starkes Hintergrundsignal durch laserinduzierte Fluoreszenz überdeckt die Raman-Signale, die sich so nicht zuverlässig analysieren lassen. Jedoch trennt die SERDS-Methode die Raman-Signale effizient vom Hintergrund und ermöglicht so eine eindeutige Zuordnung der Signale – unter anderem zu Protein-, Kohlenhydrat- und Fettbestandteilen. Deren spektrale Positionen stimmen mit publizierten Werten überein und sind in Abb. 2 durch gestrichelte Linien markiert.

Wir haben exemplarisch den Fettgehalt von Proben aus Natur- und Heidelbeerjoghurt untersucht. Abb. 3 zeigt die Netto-SERDS-Signalintensität bei 1740 cm^{-1} (C = O, Streckschwingung) in Abhängigkeit vom Fettgehalt, wie er vom Hersteller angegeben wurde. Eine lineare Anpassung für die Werte des Naturjoghurts zeigt eine lineare Korrelation mit einer Nachweisgrenze von 0,6 g / 100 g Fettgehalt unter Verwendung des 3-Sigma-Kriteriums. Der Wert für den Fettgehalt des Heidelbeerjoghurts mit seinem deutlich höheren Anteil an Fluoreszenz-Hintergrundsignal folgt ebenfalls der linearen Korrelation. Diese Ergebnisse zeigen das Potenzial von SERDS für die qualitative wie auch für die quantitative Analyse von Molkereiprodukten. Die Methode bietet der Milchwirtschaft somit ein wertvolles Analyseinstrument, das die gesamte Lieferkette vom Bauernhof bis zum Kühlschrank abdeckt.

Die Aktivitäten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziell unterstützt: im Rahmen der Projekte: iCampµs (16ES1132, 16ME0420K), OASYS (16ME0871) und im Zusammenhang mit der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD; 16FMD02).

Publikationen

[1] M. Maiwald, K. Sowoidnich, A. Müller, B. Sumpf, "Portable shifted excitation Raman difference spectroscopy for agri-photonics: from on-site precision agriculture to smart farming", Proc. of SPIE, vol. 12879, Photonic Technologies in Plant and Agricultural Science; 1287907 (2024).

[2] M. Maiwald, K. Sowoidnich, A. Müller, B. Sumpf, "Shifted excitation Raman difference spectroscopy for the analysis of milk and dairy products", Proc. of SPIE, vol. 13357, Photonic Technologies in Plant and Agricultural Science II; 1335705 (2025).

Inhaltsverzeichnis

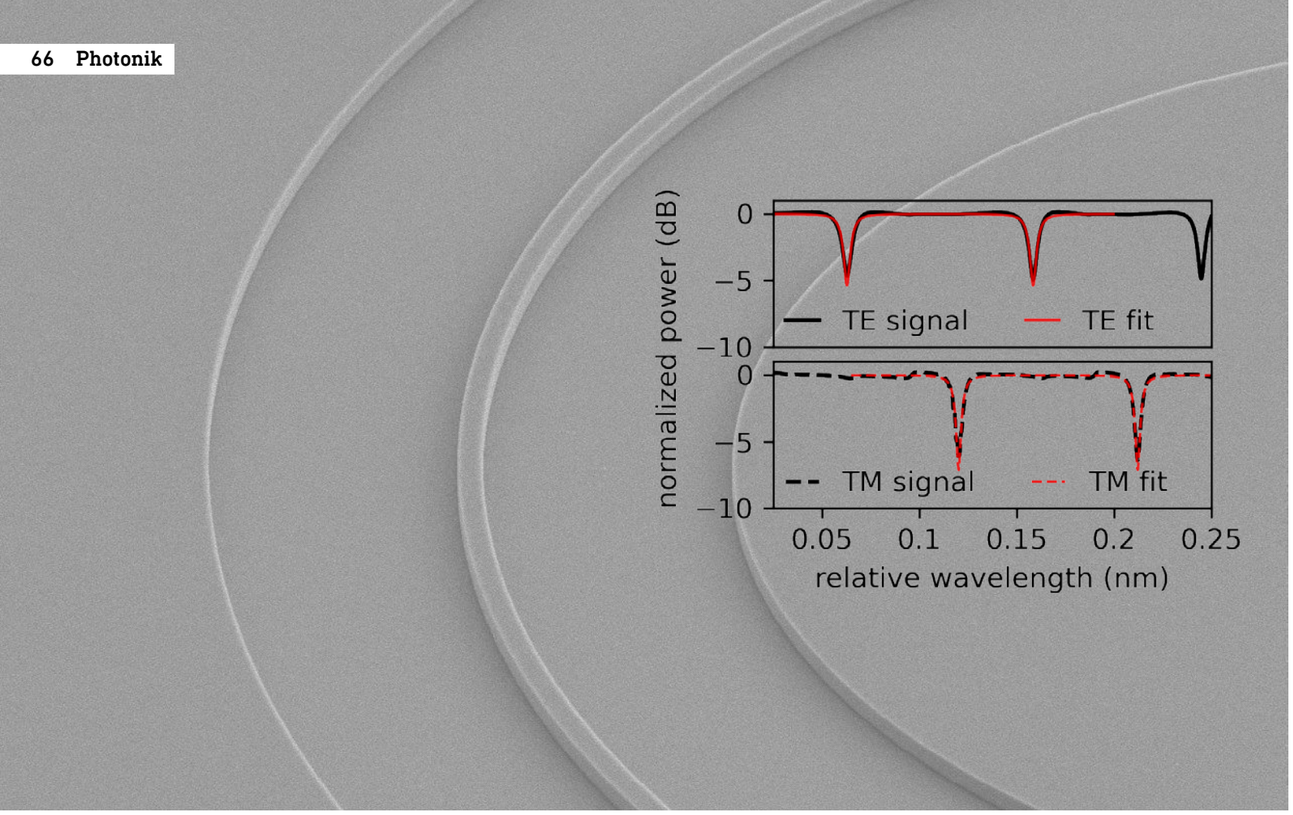


Abb. 1. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Ringresonator-Segments, das aus einem tiefgeätzten Rippenwellenleiter besteht. Die eingebettete Grafik zeigt die Resonanzen des Ringresonators für TE- und TM-polarisiertes Licht bei Wellenlängen relativ zu 1064 nm.

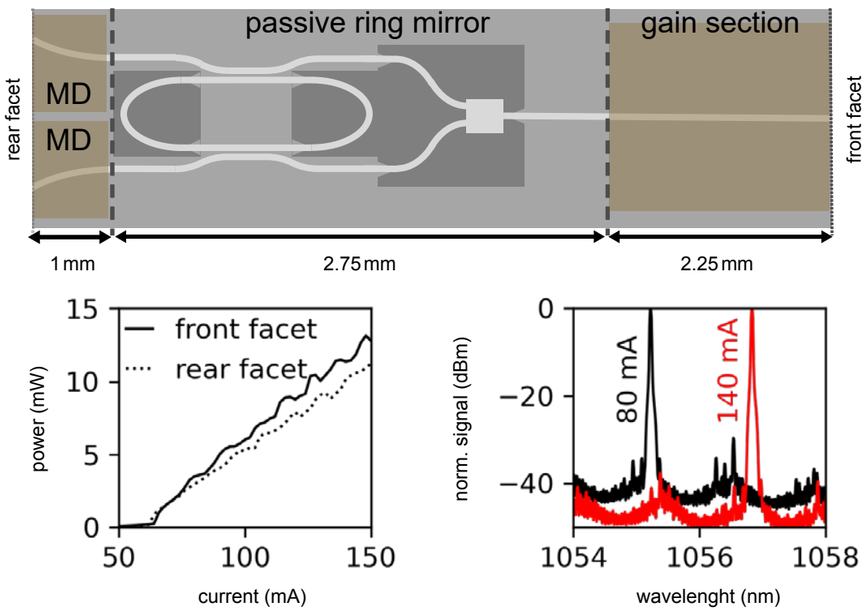


Abb. 2. Oben: Schematische Darstellung der realisierten Ringresonator-gekoppelten Laser.
Unten: Ausgewählte experimentelle Ergebnisse des Lasers, einschließlich seiner Leistungs-Strom-Kennlinien und optischen Spektren.

Neuartige GaAs-basierte PIC-Laserquellen für Quanten-, Spektroskopie- und Biosensoranwendungen

Die überwiegende Mehrheit der in Telekommunikationssystemen verwendeten monolithischen photonisch-integrierten Schaltungen (PICs) basiert auf Indiumphosphid (InP). Verschiedene Anwendungen in der Quantenphotonik, Biosensorik und Spektroskopie nutzen jedoch Wellenlängen, die mit Quantenfilm-Bauelementen auf Basis von Galliumarsenid (GaAs) erreicht werden können – für Wellenlängen zwischen 630 nm und 1180 nm. Um die Grenzen der Systemkomplexität von Bauelementen zu überwinden, die mit Standard-GaAs-Lasertechnologie hergestellt werden und auf gerade Wellenleiter sowie große Biegeradien beschränkt sind, entwickeln wir aktiv eine monolithische GaAs-PIC-Technologie. Derzeit konzentrieren wir uns auf eine Emissionswellenlänge von etwa 1064 nm, welche unter anderem für die optische Kohärenztomographie und für LiDAR-Anwendungen interessant ist. Die Grundlage für unsere PIC-Plattform bilden die exzellente III/V-Technologie des FBH und unsere umfassenden Erfahrungen mit der räumlich selektiven Entfernung von Quantenfilmen und dem zweistufigen Epitaxiewachstum. Dies ermöglicht es uns, PICs herzustellen, die optische Verstärkung und passive Wellenleiter auf demselben Chip bieten. Darüber hinaus unterstützt die Plattform flach- und tiefgeätzte Wellenleiter, die sowohl eine verlustarme Lichtausbreitung ermöglichen, mit Verlusten unter 2 dB / cm, als auch enge Wellenleiterbiegungen. Ein weiterer entscheidender Vorteil dieser Plattform ist, dass sie vollständig mit der etablierten GaAs-Laserfacettentechnologie kompatibel ist – einschließlich hochwertiger Facettenbeschichtungen.

Darüber hinaus ermöglichen die von der Plattform unterstützten tiefgeätzten Wellenleiter Ringresonatoren mit hoher Güte. Der Qualitätsfaktor dieser Resonatoren wurde auf $Q > 10^5$ charakterisiert, was höher ist als bei vielen etablierten InP-PIC-Plattformen. Diese Ringresonatoren können daher als Basis für monolithisch integrierte, weit durchstimmbare Ringresonator-gekoppelte Laser mit geringer Linienbreite dienen. Um die Leistungsfähigkeit dieses Laserkonzeptes zu demonstrieren, haben wir entsprechende Bauelemente hergestellt, die eine einseitige Ausgangsleistung von bis zu 14 mW und einen Einmodenbetrieb mit 40 dB Seitenmodenunterdrückung zeigten.

Parallel zu unseren Aktivitäten im Bereich monolithischer GaAs-PICs arbeiten wir intensiv an der heterogenen Integration von GaAs-basierten Chiplets auf passiven Wellenleiterplattformen wie verlustarmen Siliziumnitrid-(SiN)-PICs. Dabei kommt uns unsere langjährige Erfahrung in der Simulation, dem Design und der Herstellung von GaAs-Hochleistungslasern zugute. Im Mittelpunkt unseres Integrationsansatzes steht der Mikro-Transferdruck: Bei diesem Verfahren werden Laser- oder Verstärker-Chiplets mit Submikrometer-Präzision von einem III/V-Quellwafer auf einen Zielwafer übertragen, der passive Wellenleiter enthält. Dieser Ansatz bietet gegenüber monolithischen PICs mehrere Vorteile – hierzu gehören eine höhere Flexibilität, effizientere Materialnutzung der GaAs-Wafer und bessere Skalierbarkeit. Dieser Integrationsansatz ebnet den Weg zur nächsten Generation voll integrierter, GaAs-basierter Laserquellen mit höherer Funktionalität und Leistungsfähigkeit. In Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern konnten wir bereits eine Lichtverstärkung von 10 dB bei 921 nm demonstrieren – realisiert durch transfergedruckte, GaAs-basierte Verstärker, die evaneszent mittels a-Si:H-Wellenleiter gekoppelt wurden.

Ein Teil dieser Aktivitäten wurde durch das VISSION-Projekt im Rahmen des Programms Horizon Europe der Europäischen Union finanziert (grant agreement ID: 101070622).

Publikationen

[1] J.-P. Koester, H. Wenzel, J. Fricke, M. Reggentin, P. Della Casa, P. Sammeta, O. Brox, M. Ekterai, M. Kohlbrenner, A. Renkewitz, C. Zink, T. Tenzler, J. Boschker, M. Weyers, A. Knigge, "GaAs-based photonic integrated circuit platform enabling monolithic ring-resonator-coupled lasers", APL Photonics, vol. 9, no. 10, 106102 (2024).

[2] J.-P. Koester, H. Wenzel, J. Fricke, P. Sammeta, O. Brox, M. Reggentin, P. Della Casa, M. Weyers, A. Knigge, "Monolithically Integrated Active/Passive GaAs Laser Platform Including High-Q Ring Resonators", 25th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2024), Springer Proc. in Physics, Springer, Cham, ISBN: 978-3-031-63377-5, vol. 402 (2024).

[3] K. Akritidis, M. Billet, M. Kiewiet, J. Fricke, H. Wenzel, J.-P. Koester, A. Knigge, P. Neutens, R. Jansen, J. Brouckaert, P. Van Dorpe, M. Weyers, B. Kuyken, "Transfer Printing of GaAs-based Amplifiers on a-Si:H Waveguides for Evanescently-Coupled Light Amplification in the Near-Infrared Band", Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2024), ISBN 978-1-957171-39-5 (2024).

Inhaltsverzeichnis

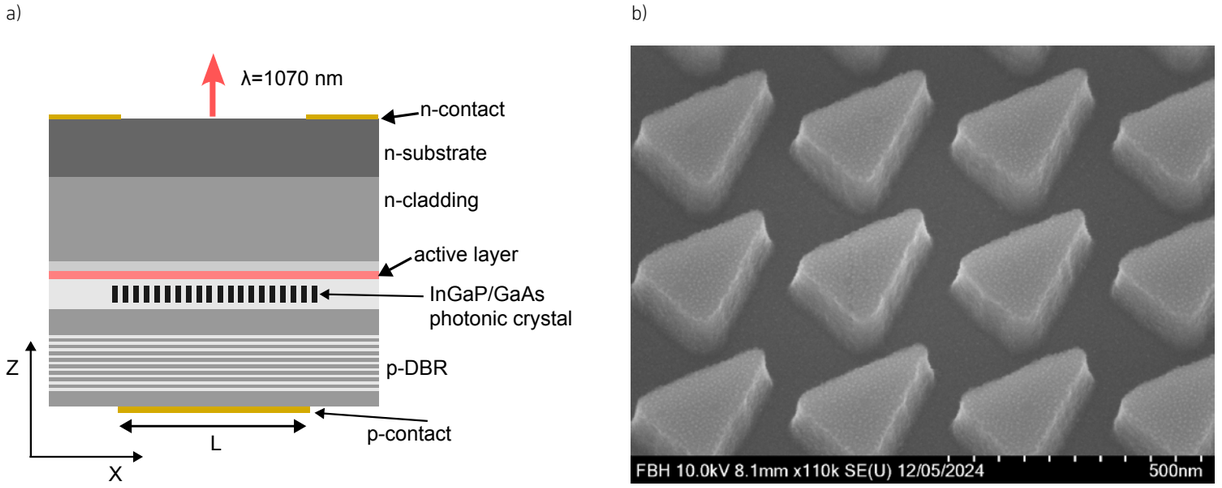


Abb. 1. Schematische Darstellung a) der fertigen PCSEL-Struktur und b) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Teils des photonischen Kristalls nach dem Ätzen.

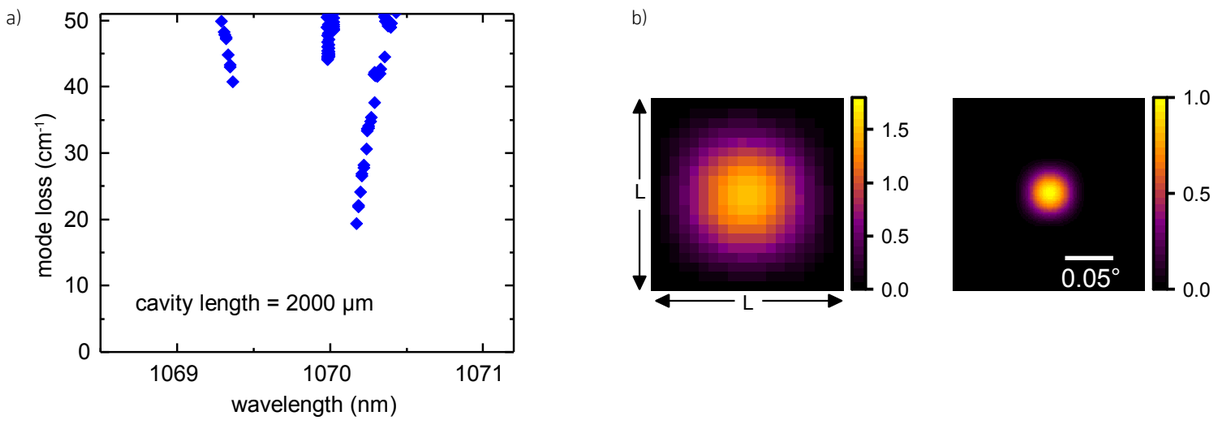


Abb. 2. Darstellungen a) des Modenspektrums des Bauelements, des Modenverlusts als Funktion der Wellenlänge und b) der Nah- und Fernfeldverteilungen der Grundmode mit dem geringsten Verlust.

Design und Technologie für komplett halbleiterbasierte oberflächenemittierende Laser mit einem photonischen Kristall

Hochleistungs-Diodenlaser sind eine Schlüsselkomponente für Anwendungen wie etwa in der Materialbearbeitung, Medizintechnik oder Automobilindustrie. Ihre Stärke liegt in der effizienten Umwandlung von elektrischer in optische Leistung. Bei hohen Ausgangsleistungen büßen jedoch viele dieser Laser an Strahlqualität ein – sie liefern deutlich weniger Brillanz als Faser- oder Festkörperlaser. Neuentwicklungen bei oberflächenemittierenden Lasern mit zweidimensionalen photonischen Kristallen (photonic crystal surface emitting laser, PCSEL) auf Basis von Galliumarsenid hingegen ermöglichen eine Skalierung der Ausgangsleistung – ohne Einbußen bei der Strahlqualität. Das Ergebnis: ein intensiver, schmaler und nahezu kreisförmiger Laserstrahl.

Bisher setzen alle leistungsstarken PCSELs auf ein Design des photonischen Kristalls (photonic crystals, PC), dem Luftlöcher in das Halbleitermaterial über ein aufwendiges, zweistufiges epitaktisches Wachstumsverfahren eingebettet werden. Diese kontrastreiche Struktur sorgt für ein besonders starkes zweidimensionales optisches Feedback und ermöglicht die Emission einer einzigen kohärenten Lasermode – verteilt über eine große Fläche. Das Licht wird senkrecht über das Substrat emittiert. Allerdings bleibt die Energieeffizienz hinter ihren Möglichkeiten zurück. Daher arbeiten unsere Wissenschaftler*innen an einem alternativen Konzept, um großflächige, leistungsstarke PCSELs zu realisieren: dem sogenannten All-Semiconductor-Design. Anstelle von Luftlöchern entsteht der notwendige Brechungsindex-Kontrast in der PC-Struktur, indem zwei Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Brechzahlen kombiniert werden. Ähnlich wie bei Gitterstrukturen von kantenemittierenden Halbleiterlasern, ermöglichen solche Gitter sehr geringe Verluste und einen hohen Wirkungsgrad. Bislang galt jedoch: PCs mit einem geringen Brechzahl-Kontrast seien für PCSELs ungeeignet, da eine starke Kopplung im Kristall erforderlich ist, um eine zweidimensionale Kohärenz und Oberflächenemission zu erzielen.

In Zusammenarbeit mit dem Weierstraß-Institut in Berlin haben wir effiziente Simulationswerkzeuge entwickelt, mit denen sich die optischen Moden großflächiger (mehrere cm^2) PCSELs, welche vollständig aus Halbleitermaterialien bestehen, schnell berechnen lassen. Diese Tools ermöglichten es, ein neues Design der Einheitszelle des PC zu entwickeln, das auf einem innovativen Ansatz mit gedehntem gleichschenkligem Dreieck (stretched isosceles triangle, SIT) basiert. Der notwendige Brechzahl-Kontrast in der Struktur wird durch die Materialkombination InGaP / GaAs erzeugt. Selbst für Kavitätslängen von L = 2 mm konnten wir bei einem PCSEL mit quadratischer Kavität L x L einen ausreichend große Unterdrückung der höheren Lasermoden sowie ein kreisförmiges Nahfeld und eine schmale Fernfeldverteilung realisieren. Eine Patentanmeldung wurde eingereicht.

Parallel dazu hat unser Team am FBH mit der Entwicklung des Herstellungsverfahrens für PCSELs begonnen. Die Gitterkonstante des PC beträgt 320 nm und ist für eine Emissionswellenlänge von etwa 1070 nm ausgelegt. Technologisch entscheidend ist die Integration der PC-Schicht in der Nähe der aktiven Schicht. Die Herstellung beginnt mit einem ersten epitaktischen Wachstum mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE) auf einem GaAs-Substrat, das mit einer InGaP-Schicht endet. Die PCs werden durch (i) Elektronenstrahllithographie, (ii) reaktives Ionenätzen und anschließendes (iii) MOVPE-Überwachsen in das InGaP eingebracht – und vervollständigen so die epitaktische Schichtstruktur des PCSEL. Wir haben einen Ätzansatz identifiziert, der es ermöglicht, PCs mit einem SIT-Design zu realisieren, das den aktiven Bereich nur wenig beeinträchtigt. Die bisher erzielten technologischen Ergebnisse ebnen den Weg für die Herstellung von PCSELs mit PCs mit einer SIT-Einheitszelle, welche vollständig aus Halbleitermaterialien bestehen. Mit der gut abgestimmten Kombination aus Design und Technologie ebnen sie den Weg für leistungsstarke, effiziente PCSELs, die unkompliziert in der Herstellung sind.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes PCSELence (K487/2022) durchgeführt, das von der Leibniz-Gemeinschaft finanziert wird.

Publikationen

[1] M. Radziunas, E. Kuhn, H. Wenzel, B. King, P. Crump, "Optical Mode Calculation in Large-Area Photonic Crystal Surface-Emitting Lasers", IEEE Photonics J., vol. 16, 1–9 (2024).

[2] B. King, H. Wenzel, E. Kuhn, M. Radziunas, P. Crump, "Design of very-large area photonic crystal surface emitting lasers with an all-semiconductor photonic crystal", Opt. Express 32, vol. 32, no. 25, 44945-44957 (2024).

[3] H. Wenzel, E. Kuhn, B. King, P. Crump, M. Radziunas, "Theory of the linewidth–power product of photonic–crystal surface–emitting lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 61 (1), 2400114 (2025).

Inhaltsverzeichnis

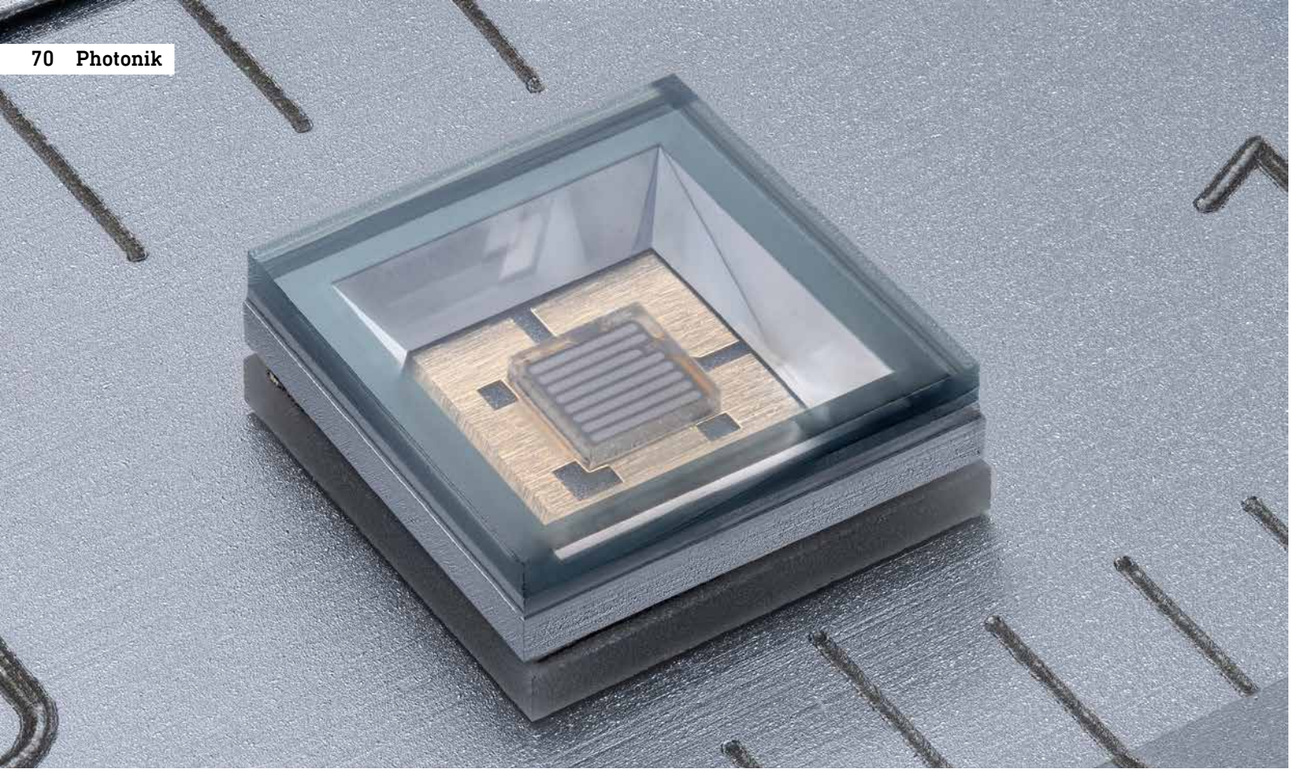


Abb. 1. Fern-UVC-LED-Chip in einem hermetisch-verschlossenen Gehäuse mit reflektierenden Seitenwänden. Das Gehäuse hat eine Grundfläche von 3,5 mm x 3,5 mm.

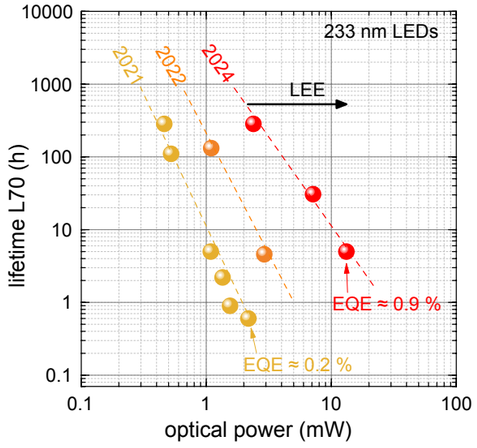


Abb. 2. L70-Lebensdauer und Emissionsleistung von 233-nm-LEDs aus verschiedenen Entwicklungszeiträumen. Die L70-Lebensdauer entspricht der Betriebszeit, nach der die Emissionsleistung auf 70 % des ursprünglichen Wertes abfällt.

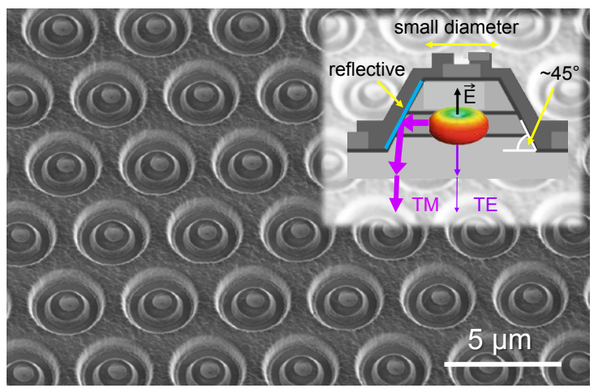


Abb. 3. Hexagonale Anordnung von Mikro-LEDs mit einem Durchmesser von 1,5 µm, die bei 234 nm emittieren, um die Auskopplung der in die Chipebene emittierten TM-polarisierten Photonen zu verbessern.

Alltagstaugliche Fern-UVC-LED-Technologie: höhere Leistung und Zuverlässigkeit

Fern-UVC-LEDs mit sehr kurzen Wellenlängen < 235 nm ermöglichen neue Anwendungen und bieten eine kompakte Alternative zu herkömmlichen Gasentladungslampen. Sie können unter anderem verwendet werden, um die Konzentration von Stickstoffoxid zu messen, da das Gas in diesem Wellenlängenbereich charakteristische Absorptionslinien aufweist. Darüber hinaus hat Fern-UVC-Strahlung die Fähigkeit, Krankheitserreger (z. B. multiresistente Keime) zu inaktivieren, ohne tief in die Haut einzudringen. Diese LEDs eignen sich daher zur hautfreundlichen Desinfektion direkt am Menschen. Schnell schaltende Fern-UVC-LEDs könnten künftig auch für abhörsichere Kommunikationslösungen im Nahbereich genutzt werden – selbst ohne direkte Sichtverbindung.

Häufig reicht jedoch die Emissionsleistung der Fern-UVC-LEDs noch nicht aus, auch ihre Lebensdauer muss weiter erhöht werden. Designanpassungen der LED-Chips führen allerdings häufig zu gegenläufigen Effekten bei der optischen Leistung und der Lebensdauer (Abb. 2). Eine höhere Effizienz geht meist zulasten der Zuverlässigkeit. Gleiches gilt für den Betrieb von LEDs mit unterschiedlichen Strömen. Niedrige Betriebsströme führen zu langen Lebensdauern, aber auch zu geringen Emissionsleistungen.

In den vergangenen Jahren haben wir entscheidende Fortschritte erzielt, die dazu führten, dass wir bestehende Leistungsbegrenzungen überwinden konnten. Unsere Untersuchungen zu Degradationsmechanismen haben gezeigt, dass die Ladungsträgerdichte und die Defektdichte im Halbleiter die Lebensdauer entscheidend beeinflussen. Deshalb haben wir das Design der Halbleiterschichten optimiert, indem wir unter anderem die Anzahl der Quantenfilme erhöht haben [3]. Anpassungen am Chip-Layout führten zudem zu einer geringeren und gleichmäßigeren Stromdichte. Darüber hinaus haben wir die für das epitaktische Wachstum der LED-Struktur verwendete AlN/Saphir-Template-Technologie variiert, um die Defektdichte im Material sowie die Polarisation und damit die Auskopplung des emittierten Lichts zu beeinflussen [4]. Dadurch konnten wir die Emissionsleistung in den letzten drei Jahren um das Zehnfache steigern, ohne die Lebensdauer zu beeinträchtigen.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Lichtextraktionseffizienz (LEE) durch Mikrostrukturierung zu verbessern. Die LEE in Fern-UVC-LEDs ist vergleichsweise niedrig, da viele der erzeugten Photonen in die Chipebene emittiert werden. Dies wiederum erhöht die Wahrscheinlichkeit für interne Totalreflexionen und Absorption im Chip signifikant. Wir haben erfolgreich einen Mikro-Pixel-Ansatz umgesetzt, der aus einem Array dicht gepackter LED-Pixel mit geringen Durchmessern und geneigten, reflektierenden Seitenwänden besteht (Abb. 3) [1]. Auf diese Weise können die in die Chipebene emittierten Photonen über die Seitenwände auf die Rückseite des Chips umgelenkt und dann durch das transparente Saphirsubstrat ausgekoppelt werden. Um einen signifikanten Effekt zu erzielen, müssen die Mikro-LEDs einen sehr kleinen Durchmesser von nur 1,5 µm haben – das entspricht etwa 50.000 Mikro-LEDs auf einem 1 mm x 1 mm großen Chip. Außerdem muss der Seitenwandwinkel nahe bei 45° liegen. Dies erfordert eine sehr hohe Genauigkeit bei der Chipherstellung. Wir haben erfolgreich Mikro-LED-Chips mit einer Emission bei 234 nm hergestellt und konnten dabei die LEE um den Faktor zwei bis drei erhöhen. Die gleiche Verbesserung zeigte sich bei der externen Quanteneffizienz (EQE), wobei wir einen EQE-Spitzenwert von 2,7 % erzielen konnten. Die Chips wurden bis zu einem maximalen Strom von 200 mA betrieben und zeigten eine Emissionsleistung von 18 mW [2].

Teile dieser Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des CORSA-Projektes (No. 03COV10E) und von der Europäischen Union/Investitionsbank Berlin (IBB) über das Pro FIT-Projekt UV-Multi (No. 10203290) gefördert.

Publikationen

[1] Jens Rass, "UV LEDs go micro", Compound Semiconductor, vol. 30, no. 3, 22-25 (2024).

[2] J. Rass, S. Hagedorn, H.K. Cho, T. Kolbe, M. Guttmann, S. Breuer, J. Ruschel, S. Einfeldt, "Influence of the AlN-sapphire template on the optical polarization and efficiency of AlGaN-based far-UVC micro LED arrays", Semicond. Sci. Technol., vol. 40, no. 1, 015019 (2025).

[3] M. Schilling, J. Ruschel, H.K. Cho, J. Rass, J. Höpfner, T. Wernicke, S. Einfeldt, M. Kneissl, "Effect of quantum well number on the efficiency and degradation of AlGaN-based far-UVC LEDs emitting at 233 nm and 226 nm", Semicond. Sci. Technol., vol. 40, no. 4, 045004 (2025).

[4] A. Knauer, T. Kolbe, S. Hagedorn, J. Höpfner, M. Guttmann, H.K. Cho, J. Rass, J. Ruschel, S. Einfeldt, M. Kneissl, M. Weyers, "Strain induced power enhancement of far-UVC LEDs on high temperature annealed AlN templates", Appl. Phys. Lett., vol. 122, no. 01, 011102 (2023).

Inhaltsverzeichnis

Integrierte Quanten-technologie

Inhaltsverzeichnis

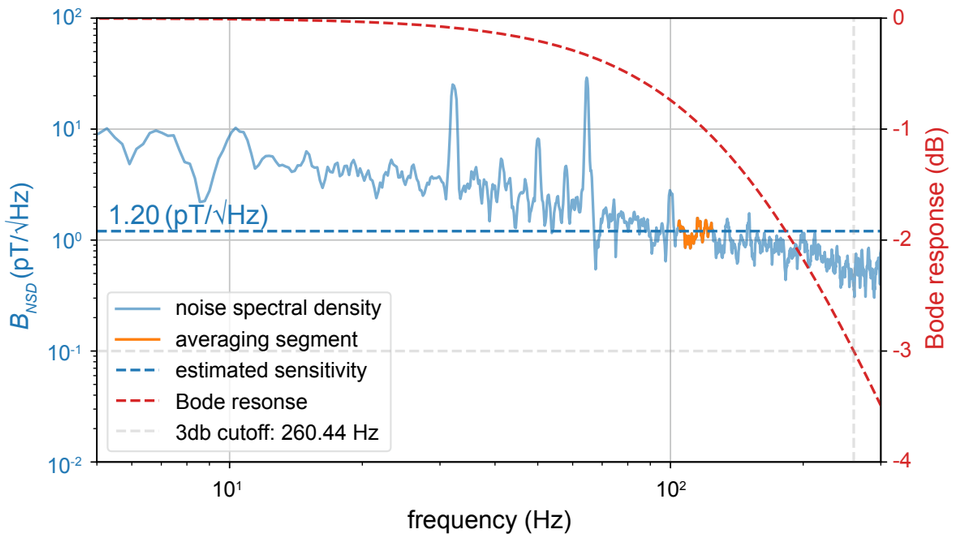
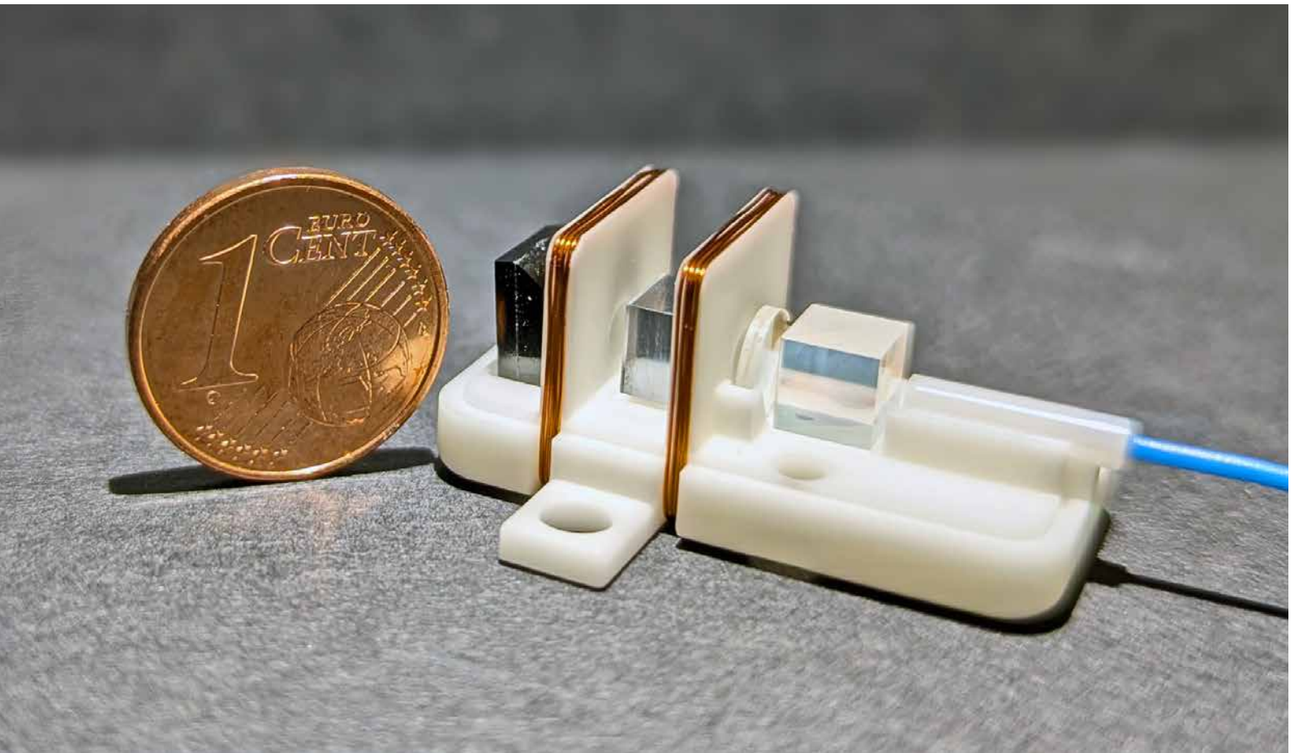


Abb. 1. Spektraldichte des magnetischen Rauschens unseres ersten miniaturisierten OPM-Demonstrators. Die Empfindlichkeit beträgt 1,2 pT/√Hz, ermittelt aus der Mittelwertbildung über relevante Messfrequenzen unterhalb der 3 dB Grenzfrequenz von 260 Hz.

Abb. 2. Prototyp eines auf einer MEMS-Dampfzelle basierenden OPM, mikro-integriert auf einer additiv gefertigten Keramikbank mit einem Gesamtvolumen von 7 ml.



Entwicklung eines mikro-integrierten, optisch gepumpten Magnetometers für biomedizinische Anwendungen

Atomare Quantensensoren machen sich die Prinzipien der Quantenmechanik und die einzigartigen Eigenschaften von Atomen zunutze, um physikalische Größen mit außerordentlicher Präzision und Empfindlichkeit zu messen. Diese hochentwickelten Sensoren eignen sich für vielfältige Anwendungen, von der Navigation und Zeitmessung bis hin zur Temperaturüberwachung und der Detektion von Gravitations- oder elektromagnetischen Feldern. Unsere Forschung im Joint Lab Integrated Quantum Sensors zielt auf die Entwicklung miniaturisierter Physikpakete, um Quantentechnologien von komplexen, großformatigen Laboraufbauten in kompakte, praxistaugliche und mobil einsetzbare Lösungen zu überführen.

Ein bekanntes Beispiel für einen atomaren Quantensensor ist das optisch gepumpte Magnetometer (OPM). Es misst Magnetfelder, indem es die Wechselwirkung von Licht mit Elektronenspins in Alkalidämpfen nutzt und diese Spins der Alkaliatome mit polarisiertem Laserlicht ausrichtet. Ist ein externes Magnetfeld vorhanden, präzediert das polarisierte Spin-Ensemble um die Feldrichtung, wodurch sich die Eigenschaften des durch den Atomdampf hindurch transmittierten Lichts leicht verändern. Durch die Messung dieser subtilen Änderungen lassen sich Größe und Richtung des Magnetfelds mit hoher Präzision bestimmen.

Im Rahmen des MyoQuant-Projekts entwickeln wir ein tragbares OPM für die Magnetomyographie (MMG). Ziel ist es, ein nichtinvasives Messinstrument bereitzustellen, mit dem der neuromuskuläre Zustand von Astronauten im Weltraum überwacht und diagnostiziert werden kann. Um solche biomagnetischen Felder messen zu können, werden Magnetfeldsonden mit Empfindlichkeiten im Sub-Picotesla-Bereich bei Messfrequenzen von einigen Kilohertz benötigt.

Wir haben einen Laboraufbau entwickelt, um Sensorkonzepte zu validieren, einzelne Komponenten zu testen und die Leistung des Sensors in einer kontrollierten Umgebung zu bewerten. Damit können wir die wichtigsten Betriebsparameter evaluieren und die Empfindlichkeit des Sensors optimieren. Die Miniaturisierung haben wir auf Basis der hierbei gewonnenen Ergebnisse weiter vorangetrieben, indem wir technische Keramiken wie Aluminiumoxid additiv gefertigt haben. Wir verwenden diese Materialien als strukturierte optische Bänke, auf denen wir mit Hilfe fortschrittlicher hybrider Mikrointegrationstechniken optische und elektronische Komponenten präzise ausrichten und bonden. Die keramischen Substrate bieten eine thermische Ausdehnung, die gut auf die der optischen Komponenten abgestimmt ist, sowie hohe mechanische Robustheit und geringe elektromagnetische Interferenz – Eigenschaften, die für Hochleistungssensoren und Quantentechnologien, insbesondere für Weltraumanwendungen, unerlässlich sind. Durch die Kombination dieser fortschrittlichen Fertigungstechniken haben wir erfolgreich einen ersten Demonstrator eines miniaturisierten Sensorpakets mit einem Volumen von 11 ml realisiert, der eine Empfindlichkeit von 1,2 pT/√Hz erreicht (Abb. 1). Unsere derzeitigen Arbeiten zur fortgeschrittenen Sensorintegration konzentrieren sich auf den Einsatz waferbasierter Alkalidampfzellen (MEMS-Zellen) mit optimierten Zellparametern. Damit wollen wir das Volumen weiter reduzieren und gleichzeitig die Empfindlichkeit und die Gesamtleistung erhöhen (Abb. 2).

Jenseits biomedizinischer Lösungen werden hochempfindliche Magnetometer für die Navigation, die geophysikalische Erforschung und verschiedene weitere Anwendungen im industriellen Bereich benötigt. Daraus ergibt sich ein erhebliches Potenzial für die Kommerzialisierung von OPMs, das wir durch Technologietransfer-Initiativen und die Teilnahme am Inkubationsprogramm Berlin Quantum Pioneer ergründet haben. Unser Vorschlag wurde mit dem Preis der Jury ausgezeichnet, was seine Einsatzfähigkeit unterstreicht.

Diese Arbeiten werden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in den Projekten 50WM2169 (MyoQuant) und 50WM2070 (CAPTAIN-QT) gefördert.

Publikation

M. Christ, C. Zimmermann, S. Neinert, B. Leykauf, K. Döringshoff, M. Krutzik,
"Additively Manufactured Ceramics for Compact Quantum Technologies",
Adv Quantum Technol., vol. 7, no. 12, 2400076 (2024).

Inhaltsverzeichnis

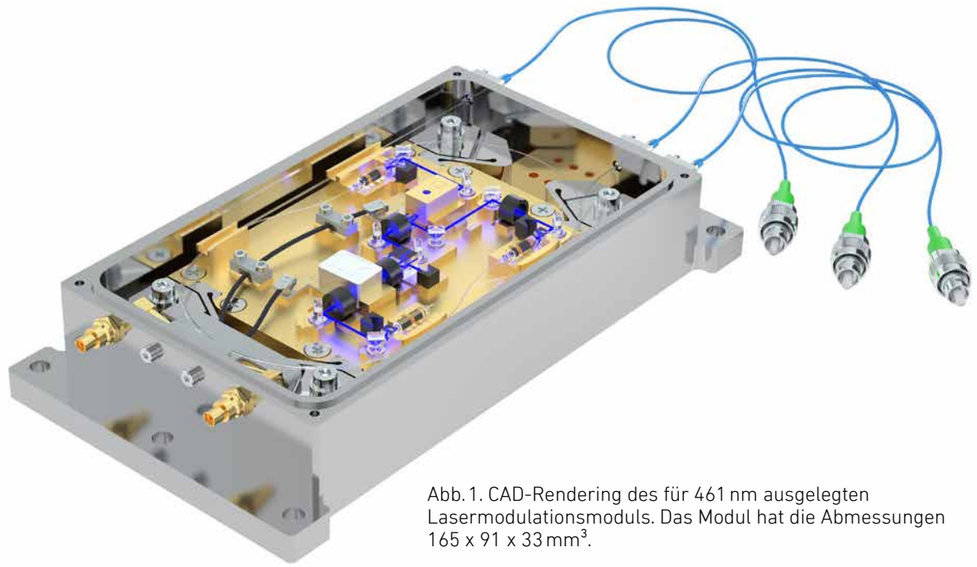


Abb. 1. CAD-Rendering des für 461 nm ausgelegten Lasermodulationsmoduls. Das Modul hat die Abmessungen 165 x 91 x 33 mm³.

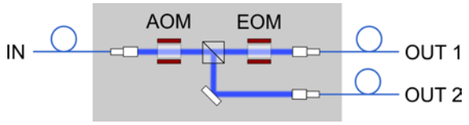
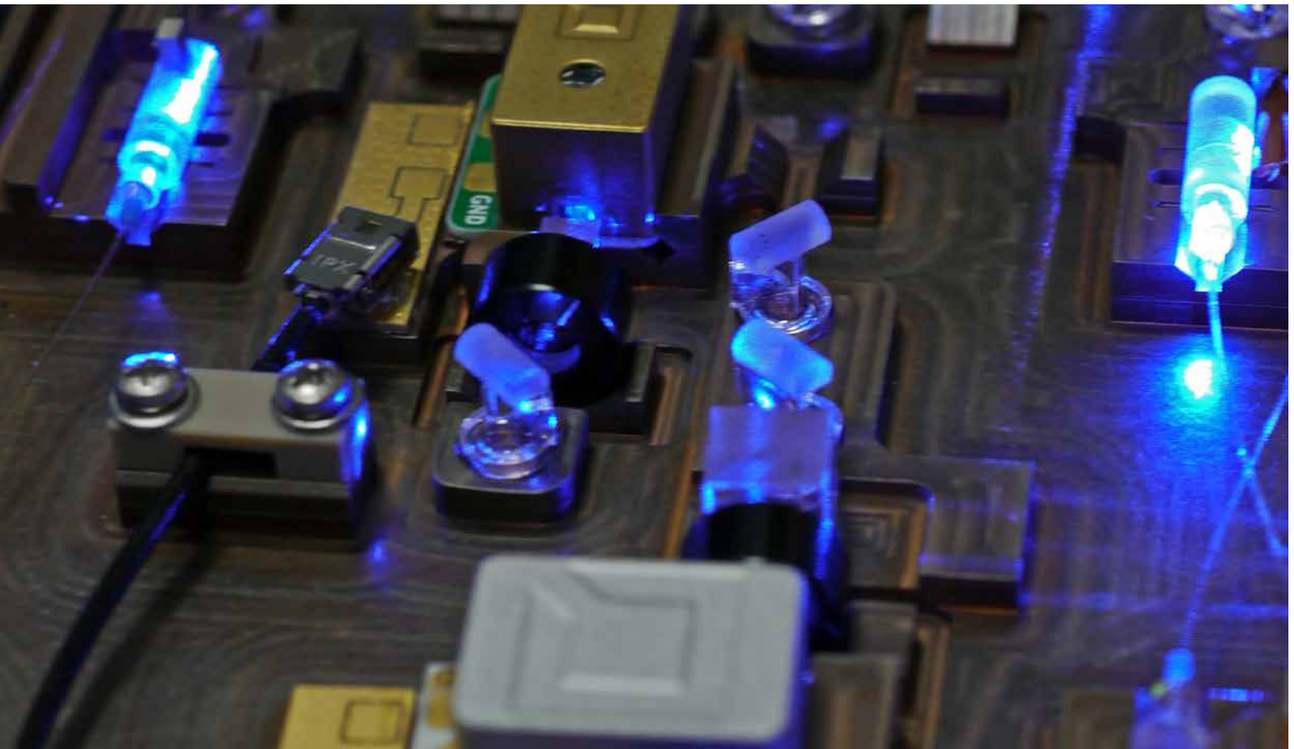


Abb. 2. Schematischer Aufbau des Lasermodulationsmoduls bestehend aus einem fasergekoppelten optischen Eingang (IN) und zwei Ausgängen (OUT 1 und 2), sowie einem AOM und einem EOM zur Amplituden- und Phasenmodulation.

Abb. 3. Miniaturisierte Modulatoren und optische Elemente im Inneren des Lasermodulationsmoduls, das bei 461 nm betrieben wird.



Mikrointegriertes Modul mit Phasen- und Amplitudenmodulatoren für den Einsatz in einer kompakten optischen Strontium-Atomuhr

Quantensensoren, wie etwa optische Atomuhren, werden immer häufiger in messtechnischen Anwendungen außerhalb kontrollierter Laborumgebungen eingesetzt. Ihre einzigartige Stabilität und Genauigkeit eröffnen ihnen völlig neue Perspektiven in der Kommunikationstechnologie, Geophysik und Grundlagenforschung. Die Anwendungen reichen von der Synchronisierung von Datennetzen über die Bereitstellung von Referenzsignalen für globale Satellitennavigationssysteme bis hin zu Anwendungen in der relativistischen Geodäsie. Ob terrestrisch oder im Weltraum – leistungsfähige optische Uhren gelten als ideale Plattformen für bahnbrechende Experimente in der Grundlagenphysik, einschließlich Tests der allgemeinen Relativitätstheorie und neuartiger Suche nach dunkler Materie.

Damit ihre hohe Präzision auch unter anspruchsvollen Bedingungen – ob im Freien auf der Erde oder im Weltraum – genutzt werden kann, müssen transportable optische Uhren kompakt, robust und widerstandsfähig gestaltet sein. Gemeinsam mit unseren Projektpartnern, der Humboldt-Universität zu Berlin (HU Berlin), Menlo Systems GmbH, QUBIG GmbH, Vacom GmbH und Layertec GmbH, entwickeln wir eine hochintegrierte optische Uhr, die auf einem thermischen Strahl aus Strontiumatomen basiert. In unserem Joint Lab Quantum Photonic Components beschäftigen wir uns mit der Miniaturisierung des benötigten Lasersystems, indem wir kompakte Diodenlasermodule mit sehr schmaler Linienbreite und Module zur Modulation von Lasersignalen entwickeln. Dafür nutzen wir unsere einzigartige hybride Mikrointegrationstechnologie. Unsere Lasermodulationsmodule verfügen über miniaturisierte akusto-optische und elektro-optische Modulatoren (AOMs/EOMs), die optische Signale präzise schalten und modulieren können.

Abb. 1 zeigt das gerenderte Design unseres ersten mikro-integrierten Lasermodulationsmoduls, das für den Betrieb bei einer Wellenlänge von 461 nm entwickelt wurde. Das Modul hat ein kompaktes Volumen von nur 0,5 Litern und eine Masse von 1 kg. Wie schematisch in Abb. 2 gezeigt, verfügt es über einen optischen Eingang und zwei optische Ausgänge, die alle mit polarisationserhaltenden Singlemode-Fasern realisiert sind. Im Inneren des Moduls durchläuft ein kollimierter Laserstrahl einen ultrakompakten AOM, der die optische Leistung für beide Ausgangsports stabilisiert. Dank seines resonanten Designs erreicht der integrierte anisotrope AOM eine hohe Beugungseffizienz von fast 90 % und benötigt dabei nur 40 mW HF-Leistung bei einer Frequenz von 78 MHz. An einem der Ausgänge sorgt ein Miniatur-EOM mit einer Frequenz von 24 MHz für die Phasenmodulation und ermöglicht so Anwendungen wie das Laser-Locking mittels Frequenzmodulationsspektroskopie. Die gesamte Einfügungsdämpfung des mikrointegrierten Moduls beträgt etwa 6 dB. Abb. 3 zeigt die Modulatoren und optischen Elemente, die mit dem Prototyp einer mikro-optischen Bank verbunden sind. Die gesamte HF-Leistung, die zum Betrieb der beiden Modulatoren innerhalb des Moduls erforderlich ist, beträgt weniger als 150 mW. Diese Eigenschaften machen das energieeffiziente Modulationsmodul zu einem essenziellen Bestandteil eines kompakten und robusten Lasersystems – eine Voraussetzung für die Realisierung optischer Atomuhren mit geringem SWaP (Size, Weight, and Power – Größe, Gewicht und Leistung).

Im nächsten Schritt wird das am FBH gefertigte Modul in den Strontium-Demonstrator für optische Uhren integriert und auf Systemebene an der HU Berlin getestet. Die erfolgreiche Montage und Demonstration dieser mikro-integrierten Einheit schafft die Grundlage für die Umsetzung weiterer Module mit unterschiedlichen Wellenlängen und Funktionalitäten, die für den Einsatz in optischen Atomuhren essenziell sind.

Diese Arbeiten werden von der VDI Technologiezentrum GmbH im Programm „Quantum technologies – from basic research to market" (No. 13N15724) mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.

Publikation

J. Hamperl, M. Gärtner, N. Goossen-Schmidt, B. Arar, M. Bursy, S. Hariharan, A. Liero, S. Nozinic, M. Schiemangk, S. Szermer, C. Tyborski, A. Wicht, "Micro-integrated laser distribution modules for low-SWaP optical atomic clocks", Proc. of SPIE, vol. 13392, Quantum Sensing, Imaging, and Precision Metrology III, 133920E (2025).

Inhaltsverzeichnis

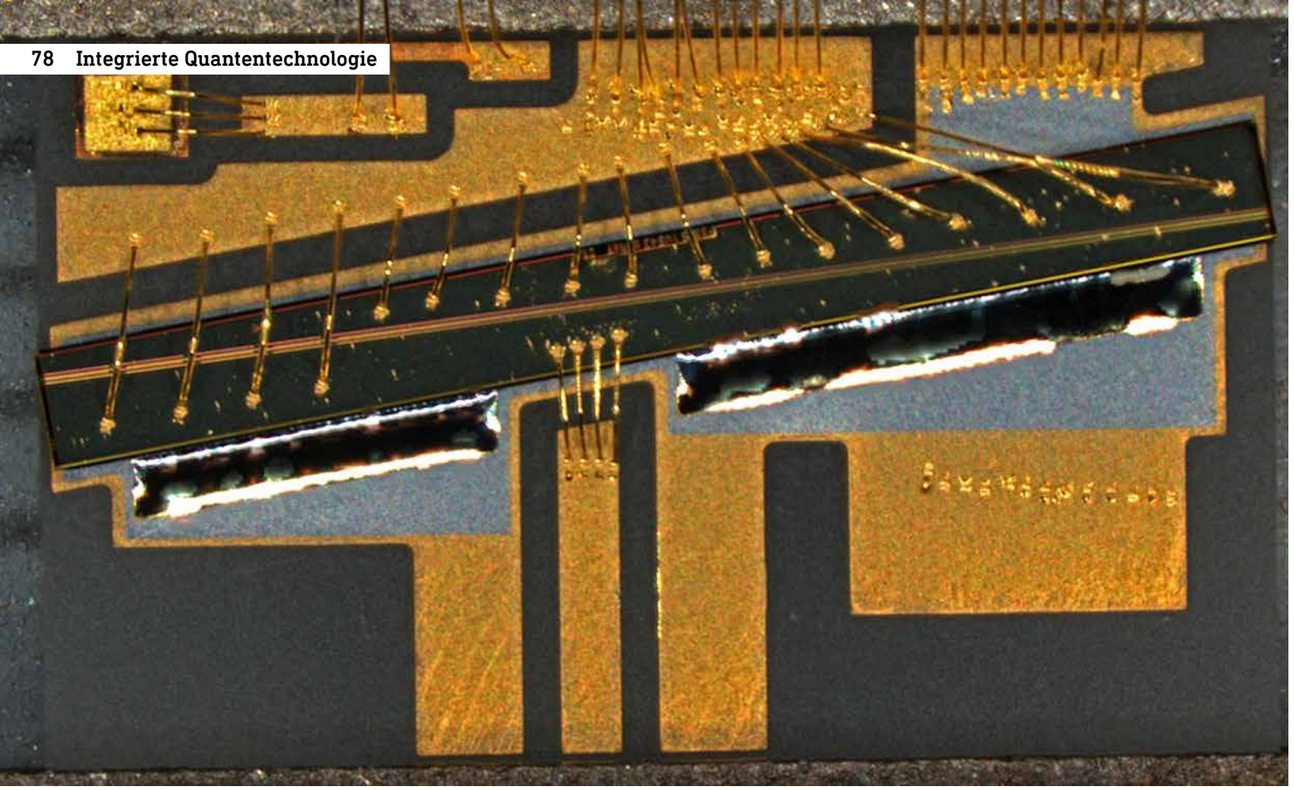


Abb. 1. Bild eines Single-Pass optischen Verstärkers.

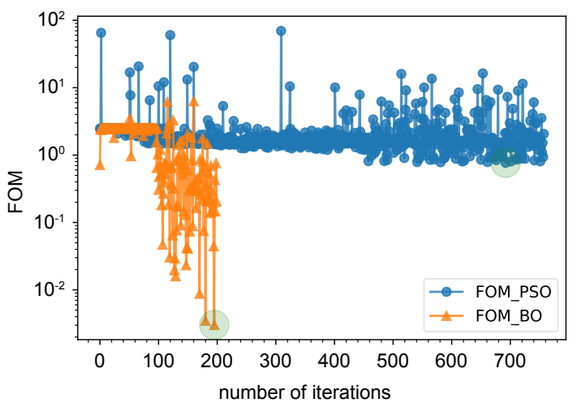


Abb. 2. Vergleich der Konvergenz von Particle Swarm Optimization und Bayesian Optimization .

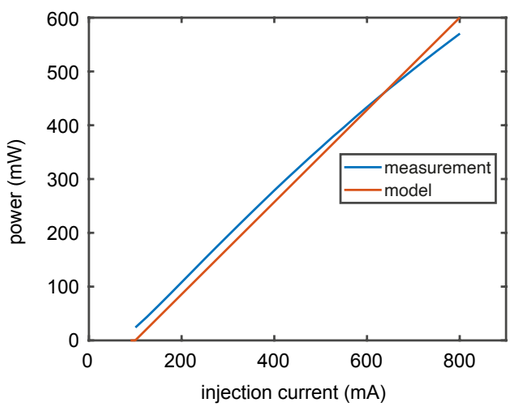


Abb. 3. Leistungs-Strom-Kennlinie des Verstärkers für unterschiedlichen Injektionsströme bei einer Seedleistung von 10 mW und optischer Rückkopplung von -44 dB: experimentelle Daten und Model-Vorhersage.

Optimierte Lasersysteme für Quantentechnologien mittels datengetriebener Modellierung

Am FBH entwickeln wir Hochleistungs-Lasermodule, die auf unserer Diodenlaser- und Mikrointegrationstechnologie basieren und für Raumfahrtanwendungen und Quantencomputing benötigt werden. Diese Systeme sind äußerst komplex, sodass Simulationen ausgehend von den first principles aufgrund des numerischen Aufwandes nicht praktikabel sind [1]. Um das Design zu optimieren, setzen wir daher auf datengetriebene Simulationsverfahren. Hierfür nutzen wir vereinfachte Modelle und extrahieren deren Parameter aus experimentellen Daten. Diese gewinnen wir durch zahlreiche Messungen verschiedener physikalischer Eigenschaften unter unterschiedlichsten Betriebsbedingungen.

Durch die Integration metaheuristischer und probabilistischer Optimierungsalgorithmen bestimmen wir in dem hier dargestellten Beispiel präzise Modellparameter für Halbleiter-basierte Single-Pass Rippenwellenleiter-Verstärker (Abb. 1) auf Basis experimenteller Datensätze. Die Daten umfassen Emissionsspektren sowie die optische Ausgangsleistung jeweils in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung. Zudem beinhalten sie rückkopplungsinduzierte parasitäre Effekte und erlauben eine vollständige Erfassung des Bauteilverhaltens. Mithilfe fortschrittlicher Optimierungsmethoden wie Particle Swarm Optimization (PSO) und Bayesian Inference (BO) [2,3] extrahieren wir systematisch die Schlüsselparameter des vereinfachten Lasermodells – und gewährleisten so eine präzise Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Das vereinfachte Lasermodell basiert auf dem Travelling-Wave-Lasermodell, das die Propagation sich vorwärts- und rückwärtslaufender optischer Wellen in einem Laserresonator beschreibt und dabei Verstärkungsdynamik, Dispersion und nichtlineare Effekte berücksichtigt. Wir haben dieses Modell in die Lumerical INTERCONNECT-Designumgebung implementiert.

Die Modelloptimierung wurde mit einem MATLAB-Skript durchgeführt, das die Parameter des zehn-dimensionalen Modellparameterraums an die experimentellen Daten anpasst. Zum Vergleich haben wir zwei Methoden eingesetzt: PSO und BO. Um die Modellparameter zu bewerten und das Modell zu optimieren, haben wir eine Figure-of-Merit verwendet, die der mittleren Quadratwurzel der Differenz zwischen gemessener und simulierter Leistung für verschiedene Injektionsströme, Seed- und Rückkopplungsleistungen entspricht. Unsere Studie zeigt, dass mit BO eine deutlich schnellere Konvergenz erreicht wird, wie in Abb. 2 zu sehen ist. Abb. 3 zeigt beispielhaft experimentelle und Modell-Daten für die Ausgangsleistung in Abhängigkeit vom Injektionsstrom bei 10 mW Seed-Leistung und einem optischen Rückkopplungsgrad von -44 dB. Das Modell sagt die experimentellen Daten mit einer Genauigkeit von ~20 % vorher, was für das Systemdesign ausreichend ist.

Diese Arbeiten sind entscheidend für die Weiterentwicklung Multi-Physik-basierter CAE-Methoden (Computer Aided Engineering) zur Entwicklung der nächsten Generation von Lasermodulen, insbesondere für Anwendungen in der Quantensensorik und Quanteninformationstechnologie. Mithilfe dieser Modelle lässt sich die opto-elektronische Performanz der Bauelemente und Module unter beliebigen Betriebsbedingungen vorhersagen. Dies ermöglicht es uns, robuste, hocheffiziente Lasersysteme zu entwickeln, die für anspruchsvolle Anwendungen in den Quantentechnologien optimiert sind.

Diese Aktivitäten wurden von der Deutschen Raumfahrtagentur unterstützt und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter den Förderkennzeichen 50WM2152 und 50WK2272 finanziert.

Publikationen

[1] Y. Rahimof, I. Nechepurenko, R. Mahani, A. Tsarapkin, A. Wicht, "The study of 3D FDTD modelling of large-scale Bragg gratings validated by experimental measurements", J. Phys. Photonics, vol. 6, no. 4, 045024 (2024).

[2] R. Mahani, I. Nechepurenko, Y. Rahimof, A. Wicht, "Optimizing data acquisition: a Bayesian approach for efficient machine learning model training", Mach. Learn.: Sci. Technol., vol. 5, no. 3, 035013 (2024).

[3] R. Mahani, I. Nechepurenko, T. Flisgen, A. Wicht, "Combining Bayesian Optimization, Singular Value Decomposition, and Machine Learning for Advanced Optical Design", ACS Photonics, vol. 12, no. 4, 1812-1832 (2025).

Inhaltsverzeichnis

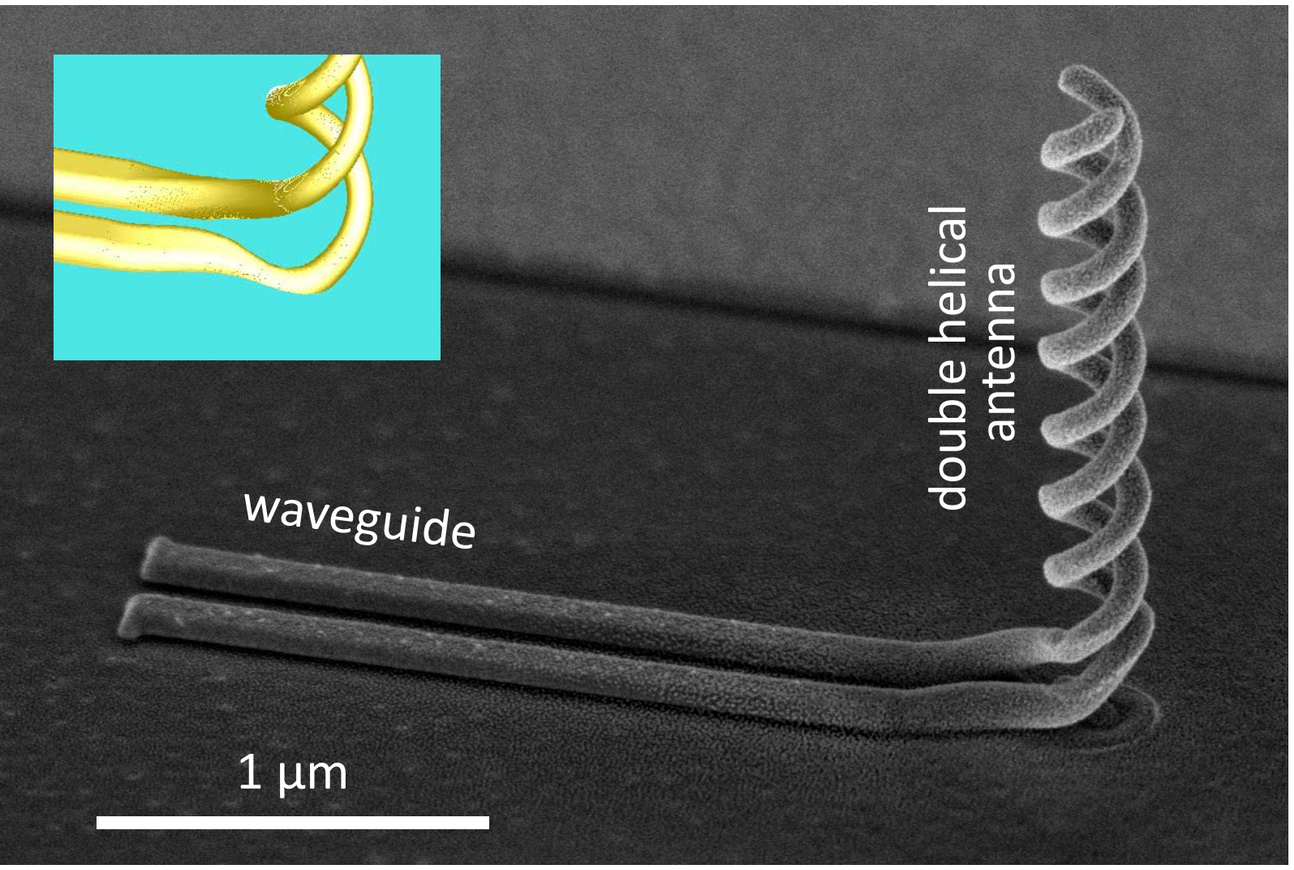


Abb. 1. Hochauflösende rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des hergestellten Bauelements, bestehend aus dem plasmonischen Wellenleiter und einer Doppelspiralantenne. Im Bild ist ein optimierter Übergangsbereich eingefügt, der mit der Simulationssoftware ermittelt wurde.

Optische Quantenbauelemente der Zukunft: Optimierung und 3D-Nanodruck von plasmonischen Polarisationswandlern durch maschinelles Lernen

Polarisation ist eine grundlegende Eigenschaft des Lichts, die direkt mit dem Spin seiner Quanten, der Photonen, zusammenhängt. Die Polarisationskontrolle ist daher für viele photonische Quanteninformationsprotokolle, die auf der Interferenz von ununterscheidbaren Einzelphotonen aus Quantenlichtquellen beruhen, unerlässlich. Es gibt zwar makroskopische Bauelemente zur Polarisationskontrolle, doch die Integration dieser Funktionalität in künftige Quantenbauelemente erfordert Lösungen im Nanomaßstab, um Licht auf Chipebene präzise zu manipulieren. Metallische Nanostrukturen bieten einen vielversprechenden Ansatz, da sie in der Lage sind, kollektive Elektrongasschwingungen (Plasmonen) an Licht zu koppeln. Durch diese resonanten Anregungen (Plasmon-Polaritonen) kann Licht auf räumliche Ausdehnungen unterhalb der Beugungsgrenze konzentriert und auf der Nanoskala kontrolliert werden. Damit lässt sich der strahlende Zerfall, d. h. die Helligkeit von Quantenemittenten um Größenordnungen erhöhen.

Wir haben ein kompaktes Bauelement auf Chipebene entwickelt, das linear polarisiertes in zirkular polarisiertes Licht auf einer Grundfläche von weniger als 1 μm^2 umwandelt. Dieses Bauelement kombiniert einen plasmonischen 2-Draht-Wellenleiter mit einer Doppelspiralantenne. Splinefunktionen sorgen für den nahtlosen Übergang zwischen der Doppelhelix und den Wellenleitern. Die Parameter wurden mithilfe eines Algorithmus zur Partikelschwarmoptimierung optimiert. Das Bauelement emittiert hochgradig links- oder rechtsgerichtetes, zirkular polarisiertes Licht mit einem hohen Grad an Polarisationsreinheit. Obwohl der Polarisationskonverter für eine bestimmte Wellenlänge optimiert ist, zeigt die Modellierung, dass er sich auch für einen effizienten Breitbandbetrieb eignet, insbesondere im nahen Infrarotspektrum. Diese Fähigkeit eröffnet die spannende Möglichkeit, ihn für die nichtlineare Optik zu nutzen, um Standard-Telekom-Fernfeldstrahlung in sichtbares Licht auf dem Chip zu konvertieren.

Um dieses miniaturisierte Bauelement herzustellen, verwenden wir ein Verfahren zum direkten Schreiben mit fokussierten Elektronen- und Ionenstrahlen. Der gesamte Herstellungsprozess findet in der Vakuumkammer eines Standardtools für die Verarbeitung fokussierter Ionenstrahlen statt. Während fokussierte Ionen Material durch Sputtern abtragen können, spaltet der Elektronenstrahl gasförmige Precursor-Moleküle im Strahlfokus und scheidet so Strukturen ab, ähnlich einem 3D-Drucker im Nanomaßstab. Wir haben die 3D-Schreibroutine durch Implementierung empirischer Kalibrierungsstrukturen optimiert. Das in Abb. 1 dargestellte Bauelement zeigt eine hohe Übereinstimmung mit dem ursprünglich simulierten Design. Derzeit evaluieren wir die Leistung der ersten Prototyp-Polarisationswandler experimentell. Dank seiner kompakten Größe und der extrem hohen 3D-Präzision könnte dieser Polarisationswandler im Nanomaßstab zu einer Schlüsselkomponente zukünftiger optischer Quantenbauelemente werden.

Diese Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts „chiralFEBID“ (No. HO 5461/3-1) gefördert. Die Aktivitäten werden zudem von der VDI Technologiezentrum GmbH mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Förderkennziffer 13N14906 unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

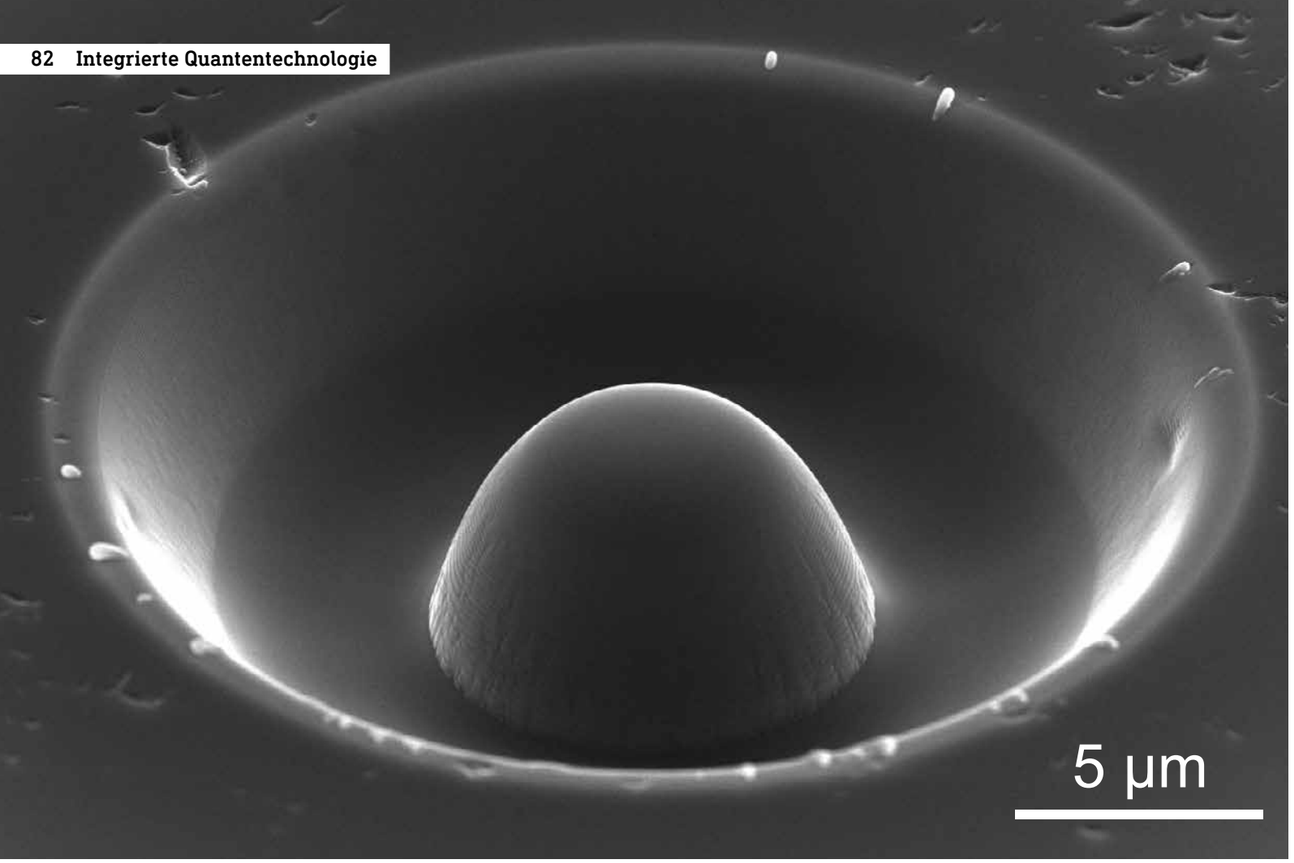


Abb. 1. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der SIL, die mit einem fokussierten Gallium-Ionenstrahl in Diamant gefräst wurde.

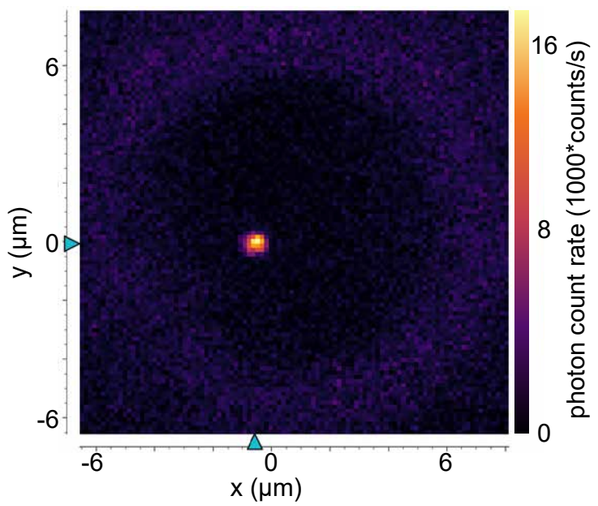


Abb. 2. Konfokale mikroskopische Abbildung des ersten SIL-Prototyps mit einem erkennbaren Photonenemitter.

Festkörper-Immersionslinsen in Diamant – für die Entwicklung von Quantennetzwerken

Das tiefere Verständnis quantenmechanischer Gesetze hat in den letzten Jahren die Entwicklung neuer Technologien vorangetrieben und eine Quantenrevolution eingeläutet. Zu den Durchbrüchen zählen Quantennetzwerke, die durch neue Methoden zur Realisierung von Verschränkungszuständen eine sichere Kommunikation über große Entfernungen hinweg ermöglichen. Voraussetzung dafür ist eine großen Anzahl von Quantenknotenpunkten, die durch den Austausch verschränkter Teilchenpaare miteinander verbunden sind und dadurch zu „Quantenverbindungen" werden. Schlüsselkomponenten für solche Infrastrukturen sind effiziente Spin-Photonen-Schnittstellen, d. h. Systeme, die stationäre Qubits (Spinfreiheitsgrade) mit ihren fliegenden Gegenstücken (Photonen, d. h. Lichtteilchen) verbinden.

Farbzentren in Diamant sind eine der vielversprechenden Plattformen, um effiziente Quantennetzwerke zu realisieren. Sie zeichnen sich durch einzelne Spins aus, die optisch adressiert werden können und lange Kohärenzzeiten ermöglichen. Oder anders gesagt: Diese Systeme sind in der Lage, Verschränkung zu erzeugen und für eine relativ lange Zeit zu speichern. Außerdem sind sie auf natürliche Weise in eine Festkörperplattform integriert, was die Herstellung von Bauelementen und integrierten photonischen Quanten-Chips ermöglichen kann. Basierend auf diesen Eigenschaften haben verschiedene Forschungsteams bereits eine Reihe von Quantennetzwerken im Labormaßstab demonstriert, bei denen eine Verschränkung zwischen drei Knotenpunkten gelungen ist. Diese beeindruckende Leistung wurde durch den Einsatz von Festkörper-Immersionslinsen erzielt.

Festkörper-Immersionslinsen (Solid Immersion Lenses – SIL) sind Mikrostrukturen, welche die Sammel-Effizienz von Licht von defektbasierten Quantenemittern in Materialien mit hohem Brechungsindex deutlich erhöhen. Ihre halbkugelige Form verhindert totale interne Reflexion und ermöglicht eine verbesserte Photonenextraktion. In unseren Joint Labs Photonic Quantum Technologies und Diamond Nanophotonics, die wir gemeinsam mit der Humboldt-Universität zu Berlin betreiben, haben wir einen neuen Herstellungsprozess für solche Strukturen entwickelt. Damit lassen sich derartige Bauelemente in Diamant an der Position von stationären Qubits produzieren. Erreicht wurde dies durch den Einsatz einer FIB-Frästechnik (Focused Ion Beam – FIB), bei der ein sehr feiner Strahl von Gallium-Ionen verwendet wird, um die SIL präzise aus dem Diamantsubstrat herauszufräsen. Dank unseres optimierten Ansatzes sind die so hergestellten SILs ohne weitere Nachbehandlung einsatzbereit. Dadurch wird der gesamte Produktionsprozess, verglichen mit ähnlichen, in der Literatur beschriebenen Bauelementen, beschleunigt.

Die erste Generation der hergestellten SILs haben wir mit Hilfe konfokaler Mikroskopie charakterisiert und ein 10-fach erhöhtes Photolumineszenzsignal der darin eingebetteten Farbzentren nachgewiesen. Dies bestätigt die verbesserte Sammel-Effizienz der Photonen und zeigt, dass unsere Bauelemente in Quantennetzwerken ebenso gut funktionieren wie bisherige Bauelemente, wobei sich ihre geringere Fertigungskomplexität als zusätzlicher Vorteil erweist.

Diese Arbeiten werden gefördert im Rahmen des Leibniz-Wettbewerbs Kooperative Exzellenz im Projekt „ENGRAVE" unter der Förderkennziffer K335/2020 und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Projekt DiNOQuant, Nr. 13N14921).

Inhaltsverzeichnis

III/V-Elektronik

Inhaltsverzeichnis

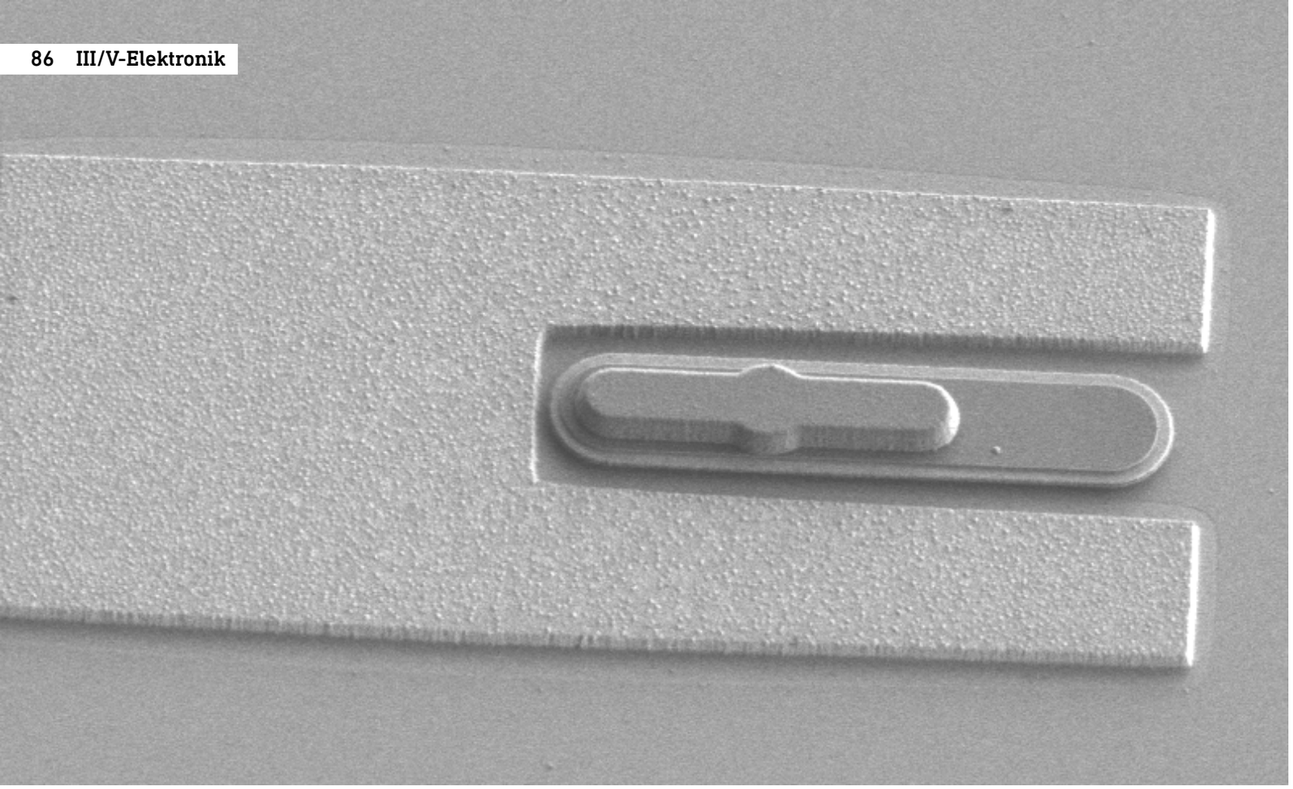


Abb. 1. SEM-Bild eines vollständig verarbeiteten Transistors im Front-End-of-Line.

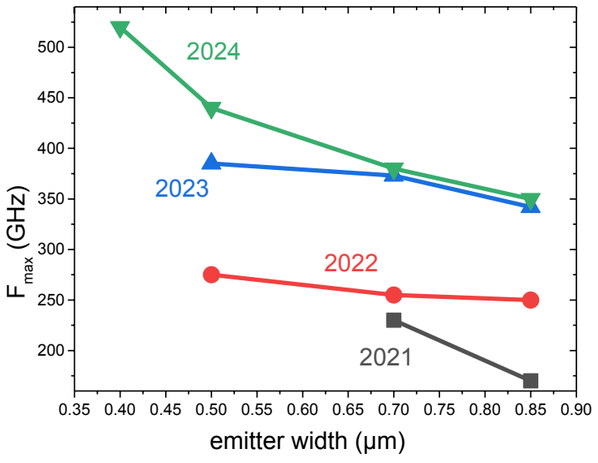


Abb. 2. Entwicklung der maximalen Oszillationsfrequenz des Transistors über verschiedene Technologiegenerationen hinweg.

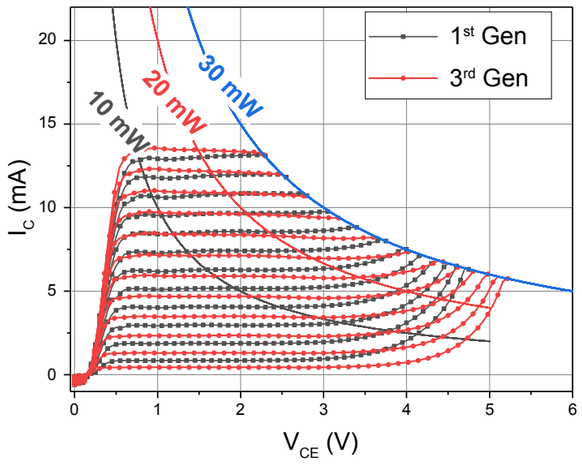


Abb. 3. Messungen des sicheren Betriebsbereichs für verschiedene Gerätgenerationen, die einen stabilen Betrieb bis zu 30 mW belegen.

Schlüsseltechnologien für D-Band-Anwendungen und darüber hinaus: InP HBT MMIC und Heterointegrationsansatz

Die gestiegene Nachfrage nach hohen Datenraten und höheren Betriebsfrequenzen – angetrieben durch technologische Bereiche wie Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsverbindungen, Sensortechnologien, Rechenzentren und künstliche Intelligenz – hat den Bedarf an Halbleitertechnologien erhöht, die diesen anspruchsvollen Anforderungen gerecht werden.

Da hochintegrierte Systeme mit extrem kleinem Formfaktor und effizientem Energieverbrauch immer wichtiger werden, ist klar, dass die standardmäßigen Si-basierten CMOS-Technologien allein nicht alle Anforderungen erfüllen können. III-V-basierte Technologien bieten aufgrund ihrer Materialeigenschaften gewisse Leistungsvorteile im Vergleich zu Si-CMOS. Es ist daher offensichtlich, dass eine ausgereifte III-V-basierte MMIC-Technologie weitere Möglichkeiten eröffnet, um in Kombination mit der stabileren Si-basierten CMOS-Technologie hocheffiziente Systeme zu realisieren.

InP-basierte Heteroübergang-Bipolar-Transistoren (HBTs) haben sich in letzter Zeit als perfekte Kandidaten für diese Herausforderungen erwiesen. Dank ihrer besonderen Materialeigenschaften, wie hoher Ladungsträgerbeweglichkeit und Sättigungsgeschwindigkeiten, konnten InP-basierte HBTs maximale Oszillationsfrequenzen (f_{max}) von über 1 THz bei Durchbruchspannungen weit über 4 V erzielen. Das macht sie ideal für D-Band-Anwendungen (von 110 bis 170 GHz) geeignet.

Wir bieten unseren eigenen MMIC-Prozess am FBH in Form einer Multi-Project-Wafer-(MPW)-Lösung an. Der Prozess bietet Designern Transistorknoten von nur 400 nm, mit f_{max} und Durchbruchspannungen von 500 GHz bzw. 4,5 V. Der Prozess basiert auf dem hochskalierbaren Triple-Mesa-Ansatz mit guter thermischer Ableitung, der eine dichte Integration aktiver Elemente ermöglicht. Zusätzlich umfasst der MMIC-Stack mehrere Routing-Metallschichten, die eine hohe Designflexibilität erlauben. Ein Process Design Kit Framework wird bereitgestellt, um die Entwurfslegung und Fehlersuche zu erleichtern.

Die nahtlose Integration von III-V-Chips mit anderen Chips und/oder Systemen stellt eine technologische Herausforderung dar. Aufgrund unterschiedlicher Technologiereifegrade, Kontaminations- und Ertragsbeschränkungen wurde die Integration traditionell auf Packaging-Ebene oder durch einfache Nähe mit Drahtbonding durchgeführt.

Am FBH bieten wir einen einzigartigen Chiplet-Integrationsansatz an. Unser Flip-Chip-Prozess ermöglicht das direkte Verbinden von InP HBT MMIC-Chiplets direkt auf CMOS- und BiCMOS-Chips mit einer Ausrichtungsgenauigkeit von unter 1 µm und RF-Verlusten von weniger als 0,5 dB bis zu 300 GHz.

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde im Rahmen der APECS-Pilotlinie durch Chips Joint Undertaking, gefördert durch Horizon Europe und Digital Europe Programme, und durch nationale Förderungen von Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Österreich, Portugal und Spanien kofinanziert. Es wurde außerdem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) finanziert.

Publikationen

[1] M. Rausch, M. Wietstruck, C. Stölmacker, R. Doerner, G. Fischer, A. Thies, S. Knigge, H. Yacoub, W. Heinrich, "Broadband hetero-integration of InP chiplets on SiGe BiCMOS for mm-Wave MMICs up to 325GHz", IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. (2023).

[2] H. Yacoub, C. Mangiavillano, M. Rausch, E. Dischke, W. Heinrich, P. Scheele, "16th German Microwave Conference (GeMiC 2025), ISBN 978-3-9820397-4-9, pp. 366-367 (2025)."

Inhaltsverzeichnis

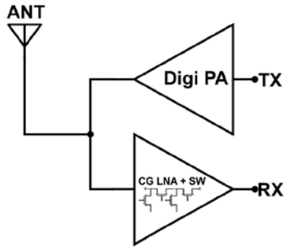


Abb. 1. Blockdiagramm des digitalen Transceiver-Konzepts mit digitalem Klasse-E Verstärker (Digi PA) und common-ground LNA (CG LNA) mit integrierten Schalter (+SW).

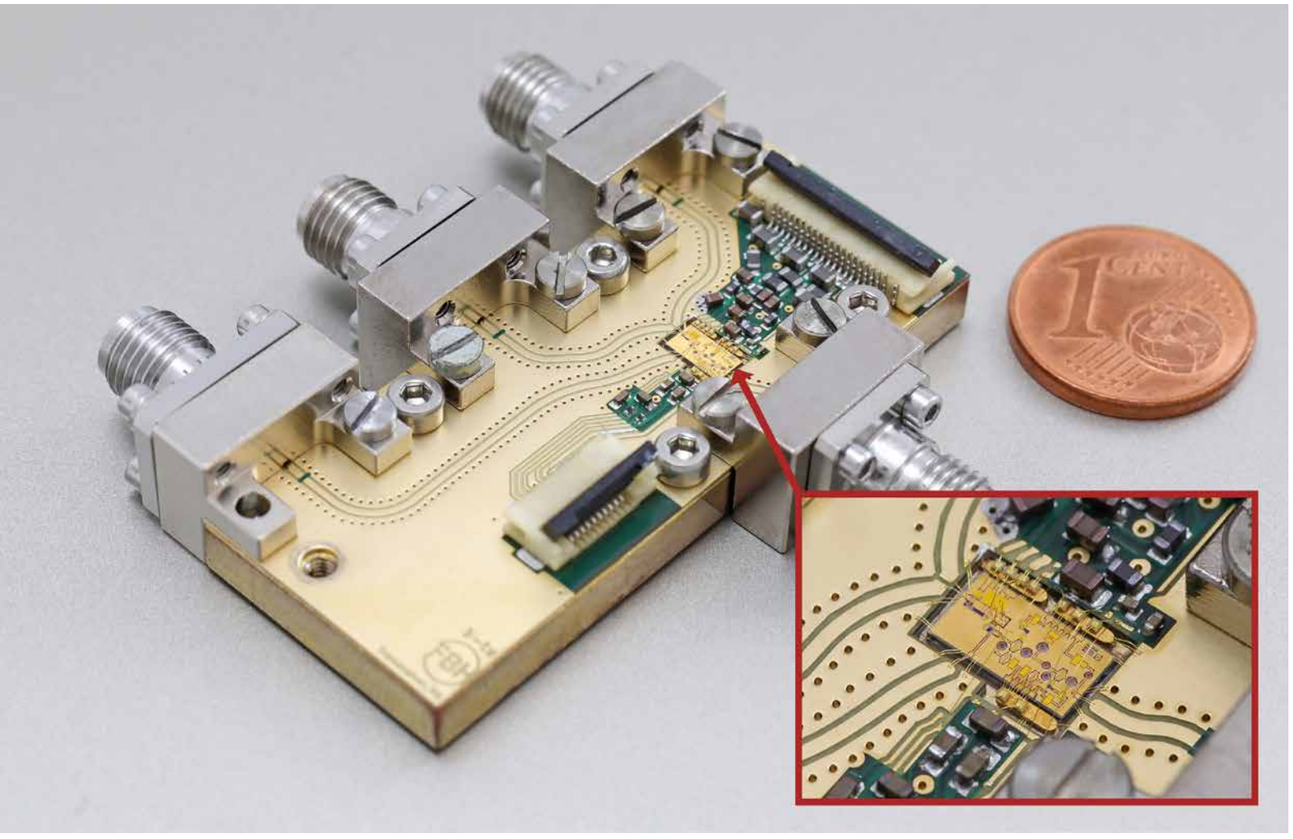


Abb. 2. Realisiertes Transceiver-Modul, Größe: 20 × 50 mm².

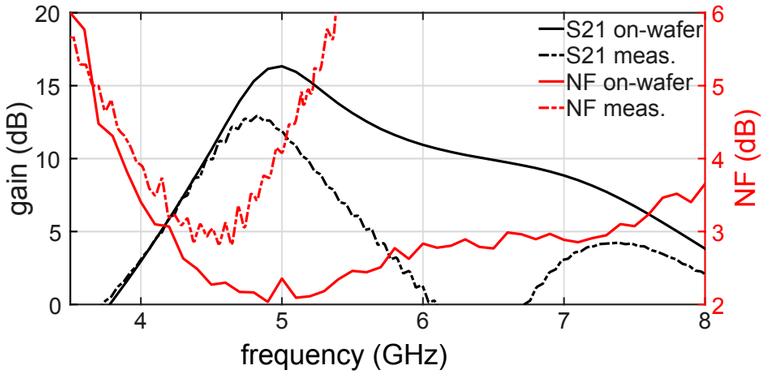


Abb. 3. Verstärkung und Rauschzahl des LNA, gemessen: on-wafer (durchgezogen) und koaxial im Modul (gestrichelt).

Digital GaN-basiertes Transceiver-Modul für zukünftige grüne 5G-Netze

Die Nachfrage nach fortschrittlichen hochfrequenten Sende-/Empfangs-Modulen wächst rasant in Bereichen wie Raumfahrt, mobile Kommunikation und Radartechnologie. Diese wesentlichen Komponenten, die für Netzwerke der nächsten Generation von zentraler Bedeutung sind, vereinen Breitbandfähigkeiten, Energieeffizienz und geringe Rauschwerte, um den aktuellen technischen Herausforderungen zu begegnen. Innovationen der letzten Zeit haben kompakte, komplett monolithisch integrierte Transceiver-Chips (TRx-MMICs) im Halb-Duplex-Betrieb bei 5 GHz hervorgebracht. Diesen haben einen rauscharmen Verstärker (LNA), einen Schalter und einen Hochfrequenz-Leistungsverstärker (HF-PA) integriert. Obwohl diese MMICs einen bedeutenden Fortschritt in der Miniaturisierung darstellen, bleibt das zugrundeliegende Konzept eher konservativ.

Aus diesem Grund präsentieren wir ein innovatives digitales Transceiver-Konzept, das einen LNA mit integrierter Schaltfunktionalität (LNAiS) mit einem echten digitalen Class-E-Leistungsverstärker (PA) unter Nutzung der GaN-Technologie des FBH auf einem Chip kombiniert (Abb. 1). Am Antennenanschluss sind PA-Ausgang und LNAiS-Eingang parallelgeschaltet, da kein separater Schalter zur Trennung der Empfangs- (Rx) und Sendepfade (Tx) erforderlich ist. Um die gegenseitige Beeinflussung und somit Mismatch von PA und LNA am Antennenanschluss zu minimieren, wurde ein optimiertes, gemeinsames Anpassungsnetzwerk entwickelt.

Dieses Konzept markiert zudem die erste Integration eines hochflexiblen, kompakten und effizienten digitalen PA auf einem TRx-Chip. Aufgrund des digitalen PA-Ansatzes kann der Tx einen weiten Frequenzbereich von einigen kHz bis 6 GHz abdecken, indem zwischen Frequenzbändern umgeschaltet wird. Dies wird einfach erreicht, indem das Eingangssignal geändert und das (breitbandige) Ausgangsnetzwerk leicht angepasst wird. Im Empfangsmodus muss lediglich für das jeweilige Band ein anderer LNA eingesetzt werden. Dieser Ansatz ersetzt mehrere schmalbandige, konventionelle analoge PA-Module, was erheblich Energie spart und den Weg für eine grünere IKT ebnet.

Der LNAiS und der digitale PA sind in einem einzigen kompakten Chip integriert (siehe Inset in Abb. 2). Die beiden Schaltungen sind über die Ausgangsinduktivität der Endstufe des PA verbunden und in einem hybriden Transceiver-Modul realisiert (Abb. 2). Im Empfangsmodus weist der LNA eine niedrige Rauschzahl von 3 dB (2,17 dB on-wafer) und eine gute Verstärkung von fast 13 dB (14 dB on-wafer) bei der Ziel-Frequenz von 4,7 GHz auf (Abb. 3). Im Sendemodus bietet der LNAiS eine hohe Isolation von über 20 dB. Der flexible digitale Class-E-PA zeigt Wirkungsgrade von 46 % für 20 MHz LTE (6,5 dB PAPR) und 25 % für OFDM (9 dB PAPR) Eingangssignale bei 4,7 GHz.

Darüber hinaus erreicht der PA eine maximale Ausgangsleistung (P_{out}) von 32 dBm bei einer Drain-Versorgungsspannung von 12 V für ein Ein-Ton-Eingangssignal mit 50 % Tastverhältnis. Zudem wurden 37 % Effizienz bei 3,7 GHz mit einem 6,5 dB 20 MHz LTE-Signal erzielt, was die Flexibilität des digitalen Ansatzes belegt – in dieser Arbeit lediglich begrenzt durch das Class-E-ähnliche Ausgangsnetzwerk. Hinsichtlich der Linearität bedürfen die Werte noch einer Verbesserung für den praktischen Einsatz. Dennoch kombiniert der vorgeschlagene neuartige digitale TRx vielversprechende Leistung mit hoher Flexibilität in der Tx-Kette und kompakterer Schaltungstechnik, da ein Antennenschalter nicht mehr erforderlich ist. Das Konzept erweist sich somit als ein guter Kandidat zur Realisierung einer grüneren IKT in zukünftigen 5G-Netzen.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Fördernummer WE6288/3-1, RU1203/17-1 finanziert. Darüber hinaus wurde sie teilweise vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) unter der Referenz 16FMD02 sowie im Projekt Green ICT @ FMD unter der Referenz 16ME0505 unterstützt.

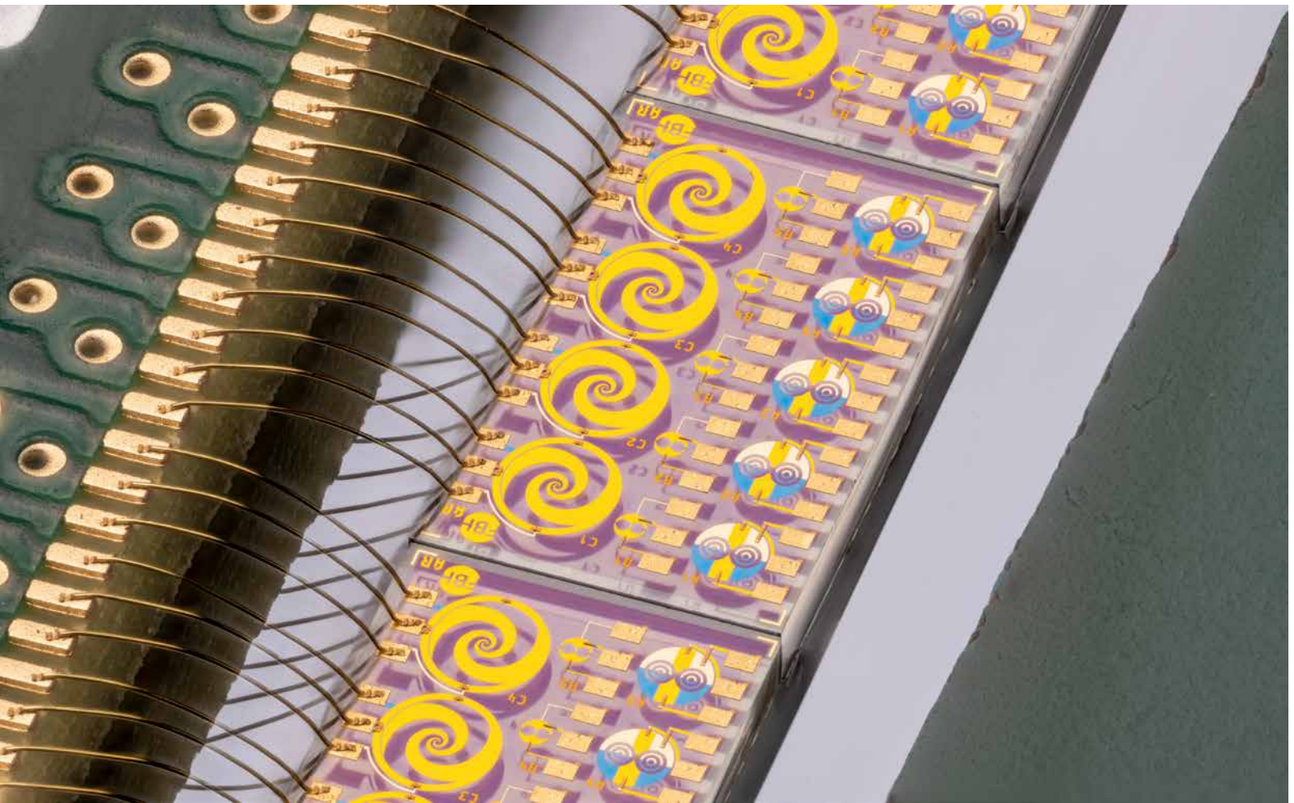
Publikation

M. Krishnaji Rao, A. Wentzel, T. Hoffmann, L. Schellhase, S. A. Chevtchenko, M. Rudolph, "Digital GaN-based Transceiver Module for Future Green 5G Networks", Proc. of 54th European Microwave Conference (2024).

Inhaltsverzeichnis

Abb. 1. Der Terahertz-Zeilenscanner erfasst einen strukturierten Wafer in Echtzeit.

Abb. 2. Großaufnahme eines Chips mit vier THz-Detektoren der THz-Detektorzeile.



Weltweit erster Terahertz-Zeilenscanner für Echtzeitsysteme realisiert

Wir haben einen Terahertz-Zeilenscanner entwickelt, der erstmals vollständig auf monolithisch-integrierten THz-Detektoren basiert. Diese Technologie ermöglicht es, größere Scanlinienlängen im industriellen Umfeld effizient und kostengünstig zu realisieren.

Terahertzstrahlung (THz) durchdringt Materialien wie Kunststoffe, Polymere, Keramik und organisches Gewebe. Sie eignet sich daher ideal für zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen und die Identifikation verborgener Objekte – etwa zur Detektion von Materialdefekten. Der neue Terahertz-Zeilenscanner wurde gezielt für industrielle Anwendungen entwickelt und zeichnet sich durch hohe Skalierbarkeit, schnellen Durchsatz und eine herausragende Bildauflösung aus. Der Technologiedemonstrator besteht aus einer leistungsstarken THz-Quelle und einem neuartigen Detektorkopf, der Objekte auf einem Förderband scannt. Das erfasste Bild wird in Echtzeit auf einen Monitor übertragen.

Der Detektorkopf enthält eine 6 cm lange Detektorzeile, bestehend aus 20 einzelnen Chips mit jeweils vier THz-Detektoren. Insgesamt arbeiten 80 Detektoren mit einem Abstand von nur 640 µm, wodurch eine hohe Bildauflösung erzielt wird. Je nach gewählter THz-Quelle können die Detektoren in einem Frequenzbereich von 100 GHz bis 1,5 THz eingesetzt werden. Die Förderbandgeschwindigkeit ist variabel einstellbar und kann bis zu 1,5 Meter pro Sekunde betragen. Jedes THz-Detektorsignal wird verstärkt und mit einer Auflösung von 16 Bit digitalisiert. Die maximale Auslesegeschwindigkeit liegt bei 15.000 Zeilen pro Sekunde – eine bisher unerreichte Messgeschwindigkeit. Messungen bei 300 GHz mit einer Abtastrate von 10.000 Zeilen pro Sekunde zeigen, dass eine vollständige Bildaufnahme bei einer Fördergeschwindigkeit von 0,25 Metern pro Sekunde in weniger als einer Sekunde möglich ist. Dabei wird ein Signal-Rausch-Verhältnis von 30 dB erreicht.

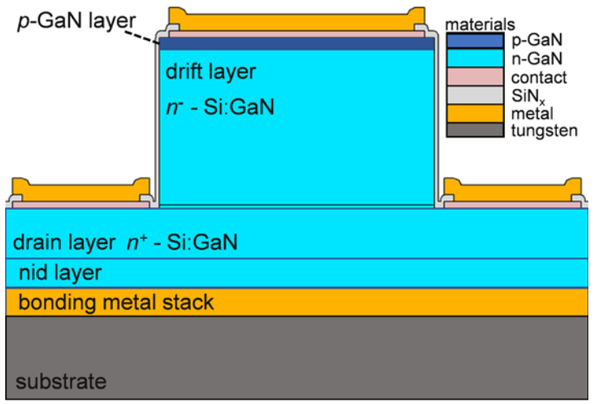
Mit diesem Terahertz-Zeilenscanner wird erstmals ein bildgebendes Echtzeitsystem mit dieser Empfindlichkeit und einer Auslesegeschwindigkeit von bis zu 15.000 Zeilen pro Sekunde im THz-Spektralbereich realisiert. Die monolithische Integration der Detektoren ermöglicht Skalierungseffekte, die eine kosteneffiziente Lösung für industrielle Anwendungen eröffnen. Zukünftig soll der Einsatz von InP-basierten THz-Detektoren [1] das Signal-Rausch-Verhältnis weiter verbessern. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für eine hochauflösende, schnelle und zuverlässige Terahertz-Bildgebung in industriellen Anwendungen.

Publikation

A. Rämer, E. Negri, H. Yacoub, J. Theumer, J. Wartena, V. Krozer, W. Heinrich, "A Monolithically Integrated InP HBT-based THz Detector", Proc. 54th European Microwave Conference (2024).

Inhaltsverzeichnis

a)



b)

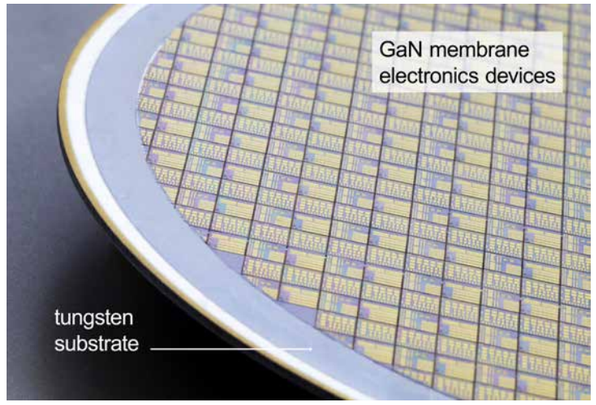


Abb. 1. a) Schematischer Querschnitt einer vertikalen GaN-Membran-*pn*-Diode auf Wolfram. b) Fertiger 4-Zoll-GaN-auf-Wolfram-Wafer mit vertikalen Diodenstrukturen.

a)

b)

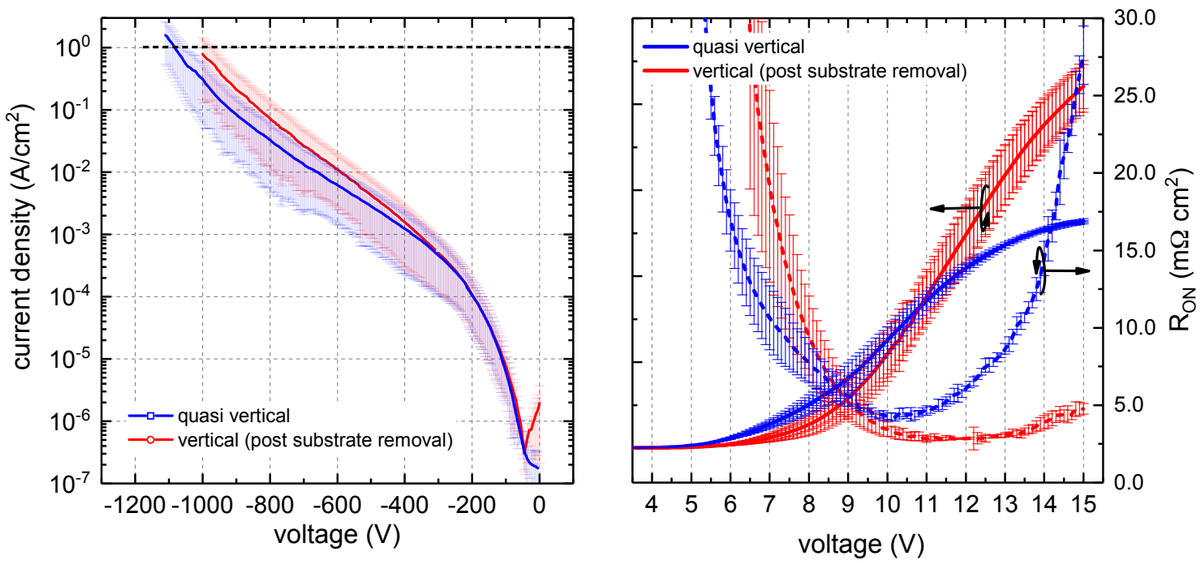


Abb. 2. a) Sperrkennlinien und b) Vorwärtskennlinien von GaN-*pn*-Dioden vor (quasi-vertikal, blau) und nach dem Wafertransferprozess (vollständig vertikal, rot).

Vertikale Hochspannungs-GaN-Membran-*pn*-Dioden auf Wolframsubstraten mittels Substrattransfer

Vertikale, auf GaN basierende Leistungsbauelemente, wie Dioden und Transistoren, bieten signifikante Vorteile gegenüber ihren lateralen, heterostrukturbasierten Pendants. Ein wesentlicher Vorzug ist der besonders niedrige spezifische Einschaltwiderstand ($R_{DS_on} \times A$), der die benötigte Chipgröße direkt senkt. Dieser Parameter kann sich mit Werten von bis zu 1,0 mΩ·cm² um eine Größenordnung verbessern, was diese Bauelementtechnologie für hocheffiziente, kompakte Anwendungen in der Leistungselektronik besonders geeignet macht.

Allerdings beruht die Technologie für vertikale GaN-Bauelemente bisher auf sehr kostspieligen leitfähigen GaN-Substraten. Alternativ können die aktiven GaN-Halbleiterschichten auch auf preisgünstigeren Fremdsubstraten wie Saphir gewachsen werden. Nach der Bauelementprozessierung wurde das elektrisch und thermisch isolierende Saphirsubstrat entfernt und die resultierende GaN-Membran anschließend auf ein leitfähiges Metallsubstrat im 4-Zoll-Wafermaßstab gebondet. Dies ermöglicht dann eine echte vertikale Leitung in ursprünglich auf Saphir gewachsenen GaN-Schichten.

Die angestrebte Sperrfähigkeit der Leistungsbauelemente von mehr als 1 kV erfordert eine mindestens 10 µm dicke GaN-Drift-Schicht mit einer niedrigen Rest-Hintergrunddotierung. Das Wachstum derartig dicker GaN-Halbleiterschichten auf Fremdsubstraten ist jedoch besonders herausfordernd. Die Gitterfehlanpassung an der Grenzfläche sowie Unterschiede in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten erzeugen eine Reihe unerwünschter Effekte, wie etwa eine erhöhte Dichte von Kristalldefekten, höhere Leckströme, mechanische Spannungen und Brüchigkeit. Dicke GaN-Driftschichten auf 4-Zoll-Saphirsubstraten führen daher zu erheblicher Waferkrümmung. Wir konnten bereits zeigen, dass Laser-Stealth-Scribing die Waferkrümmung der Saphir-Substrate ausreichend reduzieren kann und die Bearbeitung der Wafer mit herkömmlicher Stepperlithografie in der Halbleiterprozessierung dann wieder möglich ist.

Zum Substrattransfer werden die Wafer vorübergehend mit der Oberseite an einen zweiten, doppelseitig polierten Saphir-Trägerwafer gebondet. Das ursprüngliche Substrat wird mittels eines Laser-Lift-Off (LLO)-Prozesses mit einem Ultrakurzpuls-Laser entfernt. Die dünne 4-Zoll-GaN-Membranschicht mit den bereits prozessierten Bauelementen wird anschließend auf ein Wolframsubstrat übertragen. Der Membran-Transferprozess verbessert die Vorwärtsleitfähigkeit der vertikalen GaN-Dioden signifikant und reduziert den Einschaltwiderstand von 3,39 mΩ·cm² auf 1,71 mΩ·cm². Die Bauteile behalten dabei ihre hohe Sperrspannung von über 1000 V bei. Mit dieser GaN-Membran-Transfertechnik auf Saphirsubstraten gelingt es, die typischerweise hohen Kosten von vertikalen GaN-Bauelementen erheblich zu senken.

Diese Arbeit wurde teilweise durch ECSEL JU im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizont 2020 der Europäischen Union sowie von Deutschland, Frankreich, Belgien, Österreich, Schweden, Spanien und Italien unter der Fördernummer 101007229 unterstützt.

Publikationen

[1] E. Brusaterra, E. Bahat Treidel, L. Deriks, S. Danylyuk, E. Brandl, J. Bravin, M. Pawlak, A. Külberg, M. Schiersch, A. Thies, O. Hilt, "Vertical GaN-on-Tungsten High Voltage -Diodes from Sapphire-grown GaN Membranes", IEEE Elec. Devi. Lett. (2025).

[2] E. Bahat Treidel, E. Brusaterra, F. Brunner, O. Hilt, "Vertical GaN Power Switching Devices on Native and Foreign Substrates", 12th International Workshop on Nitride Semiconductors (invited) (2024).

[3] E. Brusaterra, E. Bahat Treidel, A. Külberg, F. Brunner, M. Wolf, O. Hilt, "Wafer Bow Tuning with Stealth Laser Patterning for Vertical High Voltage Devices with Thick GaN Epitaxy on Sapphire Substrates", in Proc. CS MANTECH (2024).

Inhaltsverzeichnis

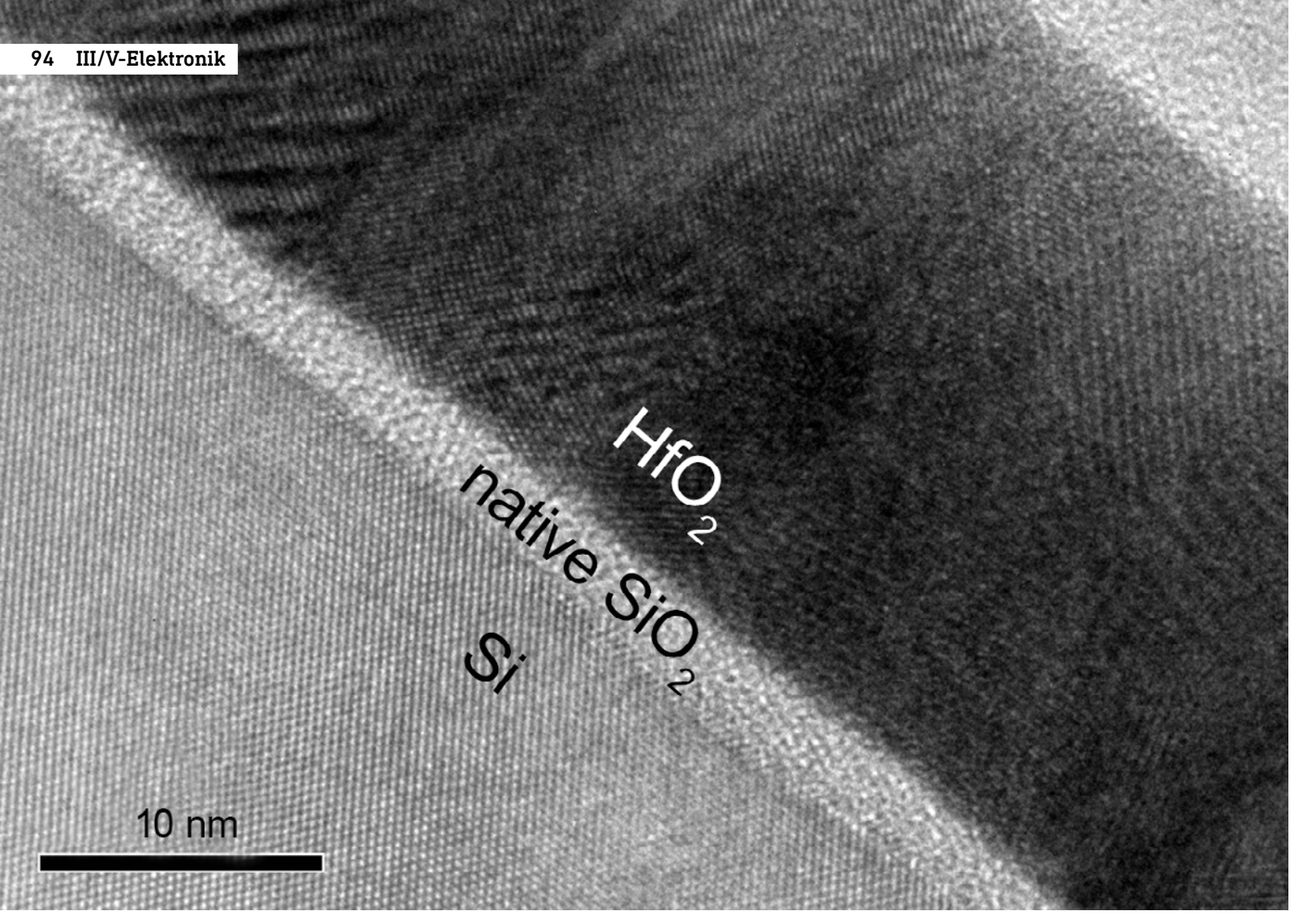


Abb. 1. Querschnittsaufnahme einer HfO_2-Schicht auf einem Si-Wafer mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM).

Dielektrika im atomaren Maßstab für zukünftige Bauelemente

Zukünftige Technologien erfordern eine präzise Kontrolle über Schichtdicke und Materialeigenschaften. Um diesen Anforderungen im Kontext künftiger Bauelemente gerecht zu werden, bieten wir eine Plattform zur Herstellung konformer dielektrischer Schichten mit atomarer Präzision.

Die Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition, ALD) hat sich als vielversprechende Methode zur präzisen Herstellung hochwertiger Dünnschichten im atomaren Maßstab für verschiedenste Materialien etabliert. Wir haben ALD-Prozesse für zwei technologisch relevante Oxide entwickelt: Al_2O_3 und HfO_2. Neben dem konventionellen thermischen ALD-Verfahren nutzen wir die plasmagestützte ALD (Plasma Enhanced ALD, PEALD), um dielektrische Schichten bereits bei Temperaturen ab 100 °C abzuscheiden – ideal für temperaturempfindliche Substrate. PEALD bietet größere Flexibilität in der Prozessentwicklung, wobei die Remote-Plasma-Konfiguration unseres Systems sicherstellt, dass Substrate nicht durch die Plasmaeinwirkung beschädigt werden.

Wir haben erfolgreich Al_2O_3-Schichten mithilfe von Trimethylaluminium (TMA) und H_2O im thermischen ALD-Verfahren sowie mit O_2-Plasma als Oxidationsmittel in der PEALD-Variante abgeschieden. Dies resultierte in einem Schichtwachstum von etwa 1,2 Å pro Zyklus, einem Brechungsindex von ca. 1,65 im sichtbaren Spektralbereich und einer Schichtdicken-Inhomogenität von 1-2 % auf 100 mm Substraten. Die resultierenden Al_2O_3-Schichten sind amorph, glatt und stöchiometrisch und gehen bei Temperung oberhalb von 600 °C in eine polykristalline Phase über.

Zur Entwicklung von PEALD-HfO_2-Schichten haben wir Tetrakis(dimethylamido)hafnium (TDMAH) und O_2-Plasma als Präkursoren eingesetzt. Dabei erzielten wir ein Wachstum von etwa 1,8 Å pro Zyklus, einen Brechungsindex von rund 2,02 im sichtbaren Spektralbereich sowie eine Schichtdicken-Inhomogenität unter 2 % auf 100 mm Wafern. Die HfO_2-Schichten durchlaufen eine amorph-polykristalline Phasenumwandlung bei Abscheidetemperaturen um 200 - 250 °C. Abb. 1 zeigt ein Querschnitts-TEM-Bild eines polykristallinen PEALD-HfO_2-Films auf einem Si-Wafer, das scharfe und chemisch klar abgegrenzte Grenzflächen verdeutlicht.

Durch die Optimierung der Prozessparameter haben wir Schichten erzeugt, die sich durch einen hohen Brechungsindex, eine kompakte Struktur (gute Materialdichte), große Dielektrizitätskonstante, exakte Stöchiometrie, geringe Rauheit und minimale Verunreinigungen (Kontamination) auszeichnen – entscheidende Faktoren für die Integration in elektronischen Bauelementen. Solche PEALD-HfO_2-Schichten werden als Gate-Dielektrika in GaN-basierten Metall-Oxid-Halbleiter-Kondensatoren (MOS-Kondensatoren) eingesetzt. Weitere Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Entwicklung elektrischer Eigenschaften nach verschiedenen Temperaturbehandlungen zu analysieren. Exemplarisch zeigt Abb. 2 die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien (bei 1 MHz und 0,1 V AC-Signal) nicht getemperter und getemperter MOS-Kondensatoren bei Vorwärts- und Rückwärtspolarisation.

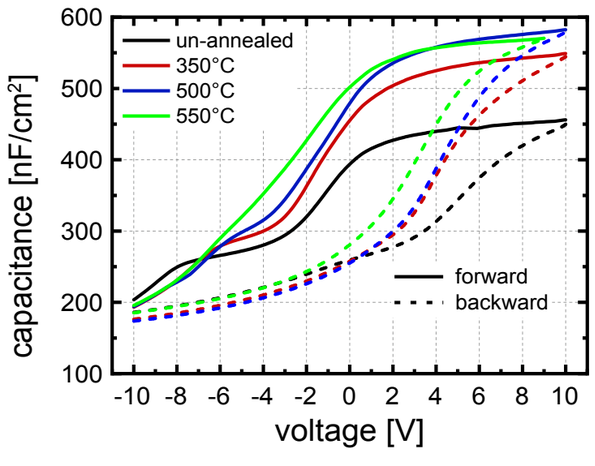


Abb. 2. Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien nicht getemperter und getemperter HfO_2-basierter GaN-MOS-Kondensatoren bei Vorwärts- (durchgezogen) und Rückwärtspolarisation (gestrichelt).

Aufbauend auf dieser Arbeit haben wir auch Al_2O_3/HfO_2-Nanolaminate hergestellt, um gezielt Eigenschaften wie Brechungsindex, Bandlücke, Dielektrizitätskonstante und Durchbruchsfestigkeit zu beeinflussen. Beispielsweise zeigen auf Al_2O_3/HfO_2-Nanolaminaten basierende Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFETs) einen dreifach höheren Vorwärtsstrom und eine fünffach höhere Gate-Durchbruchsfestigkeit im Vergleich zu reinen Al_2O_3-basierten Multischichten.

Unsere aktuellen Fortschritte eröffnen einen vielversprechenden Weg zur Entwicklung atomar kontrollierter Oxide wie Al_2O_3, HfO_2 und deren Nanolaminate mit variabler Einzelschichtdicke und Zusammensetzung. Derzeit widmen wir uns neuen Herausforderungen in der Entwicklung von ALD-Prozessen für weitere Oxide und Nitride sowie deren innovativen Anwendungen in der Bauelementtechnologie.

Diese Forschung wurde im Rahmen des Projekts YESvGaN gefördert, das durch das ECSEL Joint Undertaking (JU) unter der Fördernummer 101007229 finanziert wird. Das JU wird unterstützt durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union sowie durch Deutschland, Frankreich, Belgien, Österreich, Schweden, Spanien und Italien.

Inhaltsverzeichnis

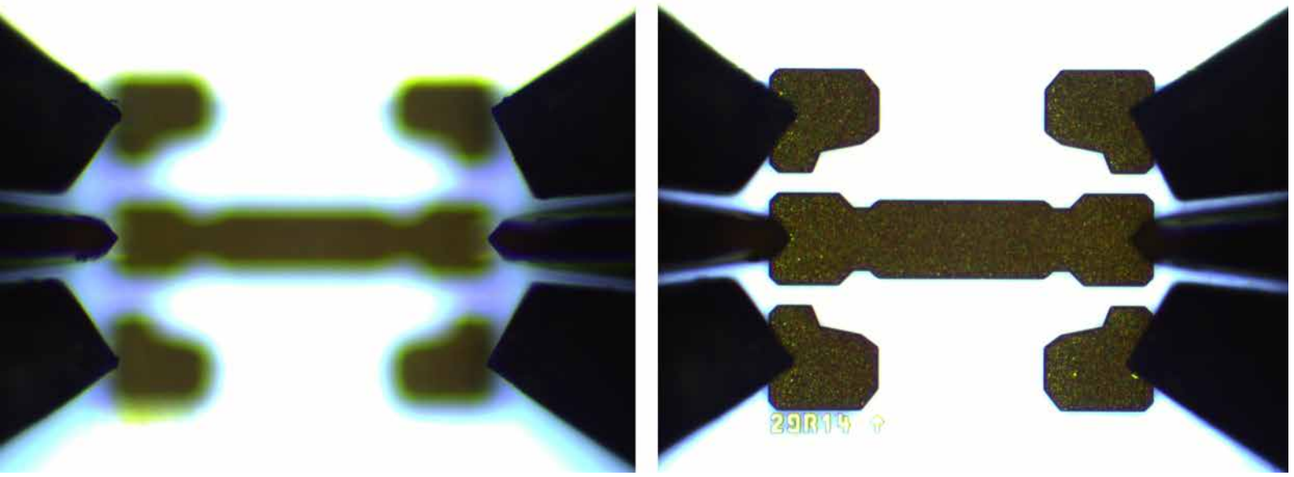


Abb. 1. Device Under Test (DUT) mit den Positionen der Probes vor dem Aufsetzen (links) und nachdem das korrekte Skating erreicht wurde (rechts).

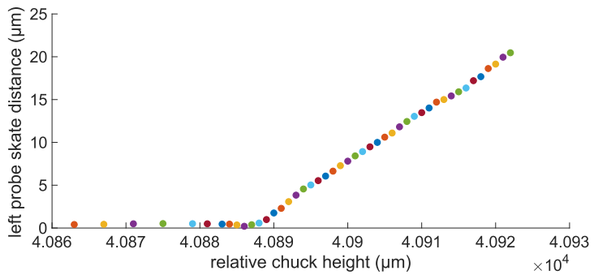


Abb. 2. Profil des Skatings, das während des Messvorgangs beobachtet wurde.

Abb. 3. Messaufbau, der die automatische Probe-Station und die Probes mit dem jeweiligen Manipulator zeigt, welche mit einem Wafer in Kontakt stehen.

Fortschritte bei der Prüfung von RF-Leistungstransistoren: präzise Automatisierung mit maschinellem Lernen

Effiziente und zuverlässige Kommunikationssysteme beruhen auf der präzisen Analyse und Optimierung von Hochfrequenz-Leistungsverstärkern. Diese wichtigen Komponenten sind unerlässlich für Innovationen, die die Energieeffizienz verbessern und gleichzeitig eine hohe Signalqualität gewährleisten, wie sie moderne Anwendungen erfordern. In der sich rasch entwickelnden Mobil- und Satellitenkommunikationslandschaft von heute sind präzise RF-Messtechniken unerlässlich, um anspruchsvolle Leistungsanforderungen zu erfüllen.

Vor diesem Hintergrund ist das Matador-Projekt entstanden, eine wegweisende Zusammenarbeit zwischen FBH und der Technischen Universität Berlin. Als eine „high-risk, high-gain"-Initiative, die zu den Gewinnern des Leibniz-Wettbewerbs 2023 zählt, zielt das Projekt darauf ab, die Grenzen der Charakterisierung und Optimierung von HF-Leistungstransistoren zu erweitern.

Im ersten Jahr haben wir eine verbesserte Methode zur Kontaktierung mit On-Wafer-Probes und Abstandskorrektur entwickelt, die eine Präzision und Wiederholgenauigkeit von unter 2 µm erreicht. Diese optisch basierte Methode erfasst in Echtzeit das sogenannte Probe-Skating – die Bewegung der Probes auf dem Wafer nach dem Kontakt – und beendet es, sobald der richtige Skating-Abstand erreicht ist. Die Methode verwendet das integrierte Mikroskop des Probe-Systems und einen programmierbaren Manipulator, der eine der beiden Probes hält, um die Kontaktierung der Transistoren an allen Positionen des Wafers automatisch anzupassen und zu regulieren. Dadurch können Unregelmäßigkeiten am Wafer, wie etwa unterschiedliche Schichtdicken, ausgeglichen und jedes Bauteil korrekt kontaktiert werden. Infolgedessen hat sich gezeigt, dass der Fehlerbeitrag durch das automatische Probing bei HF-Messungen bis zu 50 GHz erheblich verbessert wird.

Aufbauend auf diesem Erfolg erweitern wir das System nun um eine optische, auf maschinellem Lernen (ML) basierende Erkennungsmethode. Diese identifiziert die Transistoren und korrigiert eigenständig die X- und Y-Position des Wafers, sodass die Sondierung stets korrekt in Bezug auf die Antastpads erfolgt. Darüber hinaus ermöglicht die Methode die optische Erkennung verschiedener Geräteeigenschaften, einschließlich der Frage, ob bereits sondiert wurde, des Typs und möglicher Schäden.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Leibniz-Wettbewerbsprojekts MATADOR „MAchine learning for Test Automation and Design-Optimization of RF power transistors", K572/2023, gefördert. Das Messsystem wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD), Projekt 16FMD02, finanziert.

Publikationen

[1] D. Vitali, A. Chillico, W. Samek, O. Bengtsson, "Improved On-Wafer Probing of High-Frequency Components Based on Optical Recognition of the Probe Positions", IEEE Trans. Microwave Theory Tech. (2025).

[2] A. Chillico, D. Vitali, W. Samek, O. Bengtsson, "Automated On-Wafer Radio-Frequency Transistor Characterization with Adaptive Probing and Features Extraction with Uncertainties", International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits (INMMIC), (2025).

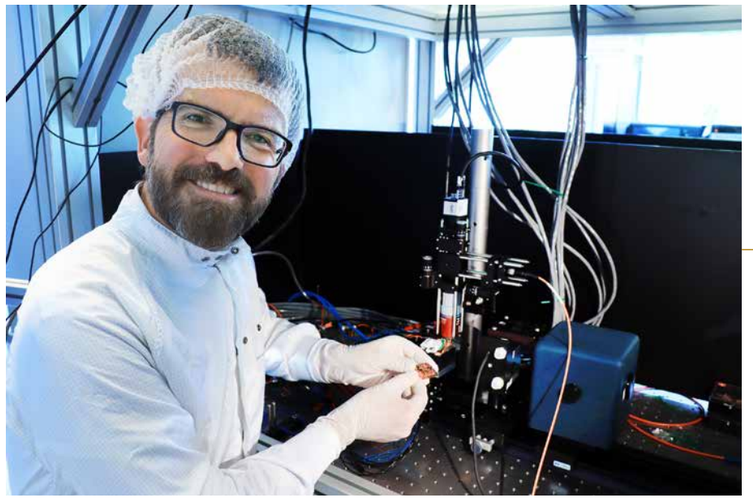
Inhaltsverzeichnis

Annex

Inhaltsverzeichnis

Thomas Flisgen ist seit dem Wintersemester 2024/25 Professor für Theoretische Elektrotechnik an der BTU.

Tim Schröder, Professor für Integrierte Quantenphotonik und Leiter des Joint Lab Diamond Nanophotonics.



Paul Crump hat im August 2024 eine Gastprofessur an der University of Glasgow übernommen.

Wissenschaftliche Exzellenz – Personalia & Auszeichnungen

Auch 2024/2025 konnten wir wieder mit exzellenten Forschungsergebnissen überzeugen. Zahlreiche FBH-Mitarbeiter*innen wurden für ihre Arbeit mit Preisen und renommierten Forschungsförderungen gewürdigt und auf Professuren berufen. Zudem waren erneut viele FBH-Publikationen unter den Editor's Picks renommierter Magazine.

Thomas Flisgen übernimmt Professur für Theoretische Elektrotechnik. Thomas Flisgen wurde zum Wintersemester 2024/25 auf die Professur für Theoretische Elektrotechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) berufen. In dieser Rolle treibt er Forschung und Lehre im Bereich der elektromagnetischen Feldberechnung voran und stärkt die strategische Zusammenarbeit von BTU und FBH.

ERC Consolidator Grant für Tim Schröder. Für seine Forschung im Bereich der Quantenphysik und Quantentechnologie erhielt Tim Schröder einen Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrats (ERC). Die Förderung für das Projekt "Multidimensional Hyperentangled Photon Graph States" beläuft sich auf etwa 2,5 Millionen Euro über fünf Jahre. Die ERC Grants zählen zu den bedeutendsten Auszeichnungen in der europäischen Forschungsförderung und werden für herausragende wissenschaftliche Leistungen vergeben.

Neu eingerichtete Gastprofessur für Paul Crump. Das FBH und die University of Glasgow intensivieren ihre Zusammenarbeit bei Anwendungen der Ultra-Hochleistungsphotonik. In diesem Zuge übernahm Paul Crump ab August 2024 eine Gastprofessur in Schottland. Er kooperiert dabei eng mit der Gruppe von Stephen Sweeney (James Watt School of Engineering), um die Partnerschaft zwischen zwei der international führenden Institute im Bereich Photonik weiter auszubauen.

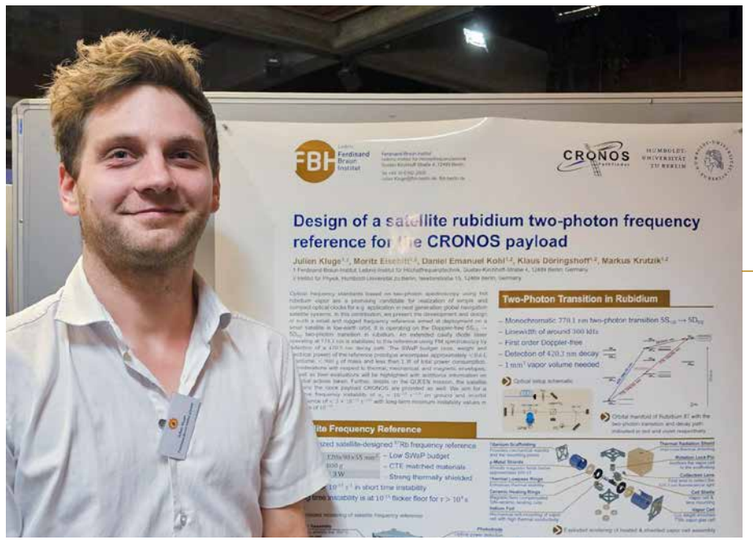
Inhaltsverzeichnis

WOCSDICE-EXMATEC 2024 Best Student Paper Award für Petros Beleniotis. Petros Beleniotis hat für sein Paper „A Computational Modeling Method for Performance Optimization of GaN HEMT" den Best Student Paper Award auf der WOCSDICE-EXMATEC 2024 Konferenz in Heraklion, Kreta, Griechenland erhalten.

ESLW Best Student Talk Award für Nor Ammouri. Nor Ammouri wurde auf dem European Semiconductor Laser Workshop 2024 (ESLW) in Kassel mit dem Best Student Talk Award für den Vortrag „364 W high pulse power laser with multiple epitaxially stacked active regions for LiDAR applications" ausgezeichnet.

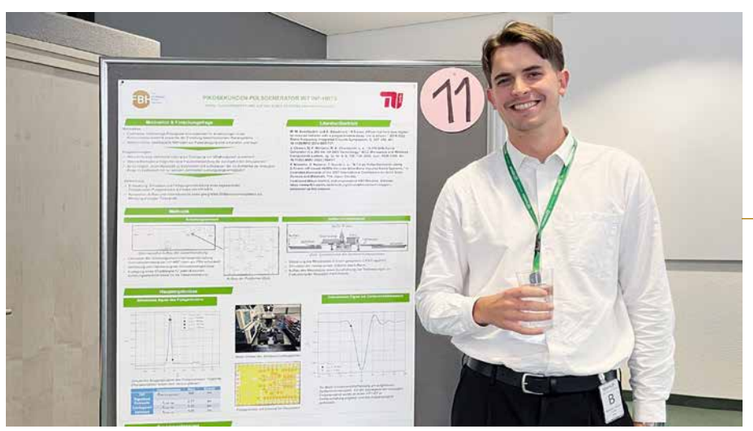
Thomas Tenzler erhält ESLW Best Student Poster Award. Thomas Tenzler hat auf dem European Semiconductor Laser Workshop 2024 (ESLW) in Kassel den Best Student Poster Award erhalten. Er präsentierte hier Simulationsergebnisse eines Bragg-Reflexions-Wellenleiter-Lasers im Projekt VOMBAT.

Hot Atomic Vapor Workshop Posterpreis für Julien Kluge. Julien Kluge wurde beim Hot Atomic Vapor Workshop 2024 in Stuttgart mit dem Posterpreis ausgezeichnet. Er präsentierte ein Design für eine Rubidium-Zwei-Photonen-Frequenzreferenz für die Nutzlast im Projekt CRONOS.



Julien Kluge beim Hot Atomic Vapor Workshop,

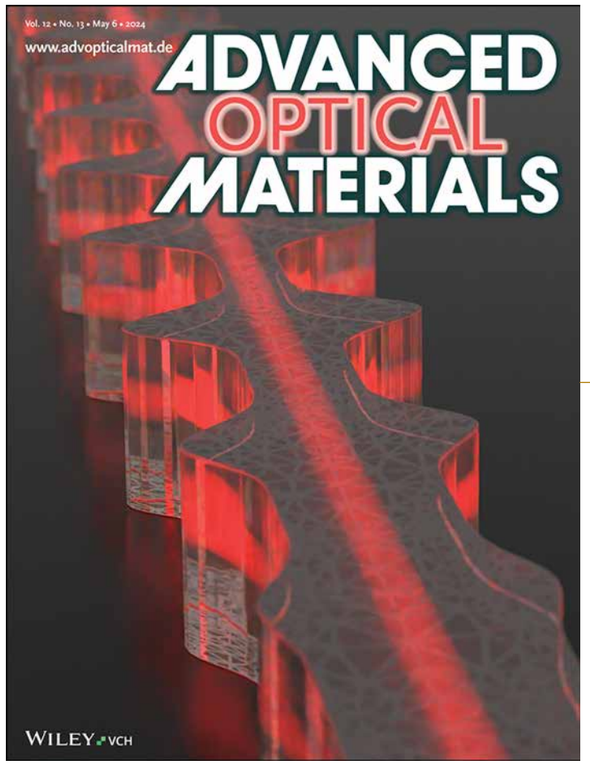
Dritter Platz beim ARGUS Science Award für Sebastian Ahrens. Sebastian Ahrens wurde für seine Masterarbeit mit dem Titel „Pikosekunden-Pulsgenerator mit InP-HBTs-Schaltungskonzept und Aufbau eines Zeitbereichsmessplatzes" mit dem dritten Platz beim ARGUS Science Award ausgezeichnet.



Für seine Masterarbeit ausgezeichnet: Sebastian Ahrens.

Inhaltsverzeichnis

Eine Hälfte des Gewinnerteams: Sascha Neinert mit dem von ihm und Kirti Vardhan gewonnenen Jury-Preis.



Das Sawfish-Design von Julian M. Bopp et al. auf dem Cover von „Advanced Optical Materials".

MyoQuant auf den Berlin Quantum Pioneer Days mit Jury-Preis ausgezeichnet. Sascha Neinert und Kirti Vardhan wurden für ihre Forschungsarbeiten im Projekt MyoQuant mit dem Jury-Preis des Berlin Quantum Pioneer Inkubationsprogramms ausgezeichnet.

Gemeinsames Paper auf dem Titelblatt von „Advanced Optical Materials". Die Publikation „‚Sawfish' Photonic Crystal Cavity for Near-Unity Emitter-to-Fiber Interfacing in Quantum Network Applications" von Julian M. Bopp et al. und weiteren Autoren des FBH, des Zuse Institute Berlin und der Humboldt-Universität zu Berlin hat es auf das Titelblatt von „Advanced Optical Materials" (Volume 12, Issue 13) geschafft.

Publikation als Editor's Pick der APL Photonics ausgewählt. Das Paper „GaAs-based photonic integrated circuit platform enabling monolithic ring-resonator-coupled lasers" von Jan-Philipp Koester et al. ist in APL Photonics erschienen und wurde als Editor's Pick ausgezeichnet.

Publikation in Optics Express ist Editor's Pick. „Micro-integrated crossed-beam optical dipole trap system with long-term alignment stability for mobile atomic quantum technologies" von Marc Christ et al. wurde von Optics Express als Editor's Pick gewählt.

Inhaltsverzeichnis

Veranstaltungen – Konferenzen, Workshops & Messen

Auch im vergangenen Jahr war das FBH wieder auf zahlreichen internationalen Messen und Konferenzen vertreten. Dort konnten wir uns mit der Fachcommunity austauschen, aktuelle Ergebnisse vorstellen und das Leistungsspektrum unseres Instituts präsentieren.

Ausgewählte Event-Highlights auf internationalen Bühnen

Bei den diesjährigen **DPG-Frühjahrstagungen** in Berlin und Freiburg haben wir mit einer Fülle von Vorträgen unsere neuesten Forschungsergebnisse präsentiert, insbesondere in den Bereichen Photonik, Quantensensorik und AlGaN- sowie InGaN-Technologie.

Auf der **CLEO Conference** in Charlotte, North Carolina (USA) konnten wir dem Fachpublikum wieder eine Reihe von Neuerungen aus unseren Bereichen Laser- und Quantentechnologien vorstellen.

Neue Entwicklungen bei Gruppe-III-Nitrid-Materialien, -Nanostrukturen und -Bauelemente standen im Zentrum unserer Beiträge beim **12th International Workshop on Nitride Semiconductors** in Taipei (Taiwan).

Optische, optoelektronische und photonische Komponenten für Anwendungen im Weltraum waren Gegenstand unserer Beiträge zur **International Conference on Space Optics** in Antibes Juan-les-Pins (Frankreich).

Bei der **IEEE Photonics Conference** 2024 in Rom (Italien) waren unsere Wissenschaftler*innen mit mehreren eingeladenen Vorträgen und in etlichen Komitees vertreten.

Zur 2024er Ausgabe des **European Semiconductor Laser Workshop** in Kassel steuerten wir zahlreiche (Keynote) Talks bei und beteiligten uns am Organisations- und Programmkomitee.

Beim **International Microwave Symposium (IMS)** in Washington, DC (USA) konnten wir unsere Expertise im Bereich InP-HBT-Technologie für 5G-Applikationen präsentieren.

Auf der **21st International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE XXI)** in Las Vegas (USA) standen unsere GaAs-basierten VCSEL-Strukturen im Vordergrund.

Mit Beiträgen zur **iCampµs Cottbus Conference iCCC2024** und zum **Adlershofer Forschungsforum** in Berlin (u. a. mit einem Vortrag unseres wissenschaftlichen Geschäftsführers Patrick Scheele) beteiligten wir uns an der regen wissenschaftlichen Diskussion in der Region.

Das größte internationale Treffen der Photonik-Branche, die **Photonics West** in San Francisco (USA) im Januar, war erneut der gelungene Auftakt für unser Event-Jahr 2025. Hier präsentierten wir unser komplettes Leistungsspektrum im Bereich Diodenlaser – vom Design über die Chipentwicklung bis hin zu Modulen und Prototypen. Neben weiterentwickelten Halbleiter-basierten Lichtquellen stellten wir neuartige Quantenlicht-Module und das leistungsfähige Direkt-Diodenlasersystem „Samba“ vor. 18 wissenschaftliche Vorträge auf den begleitenden Konferenzen rundeten unseren Auftritt ab.

Wo wir sonst noch zu finden waren und sind

Inhaltsverzeichnis

Die Lange Nacht der Wissenschaften zog wieder zahlreiche Besucher*innen an.

Volles Haus und gespannte Aufmerksamkeit beim Mädchen-Technik-Kongress.

Eine Woche voller Workshops: Das erste Green ICT Camp am FBH.

Forschung für alle

Am 22. Juni 2024 war es endlich wieder so weit: Bei der **Langen Nacht der Wissenschaften** konnten Wissenschaftsbegeisterte bei uns die Welt von Mikrochips, reiskorngroßen Diodenlasern und Mikroelektronik-Bauelementen entdecken. Kinder und Erwachsene legten bei den Mitmach-Experimenten selbst Hand an und warfen einen Blick in unsere Reinraum- und Speziallabore.

Unser Ziel, mehr Mädchen und junge Frauen für ein MINT-Studium oder einen MINT-Ausbildungsweg zu begeistern, haben wir natürlich auch 2024 verfolgt. Beim **Mädchen-Technik-Kongress,** den das am FBH angesiedelte Aus- und Weiterbildungsnetzwerk Hochtechnologie ANH Berlin organisierte, schlüpften 158 Schülerinnen in die Rolle von Forscherinnen, Programmiererinnen oder Laborantinnen. Auch beim diesjährigen **Girls'Day** und der **Ausbildungs-Allianz-Adlershof** nutzen wieder viele Mädchen und junge Frauen die Chance, sich über ihre Karrieremöglichkeiten im Hochtechnologiebereich zu informieren. Außerdem nahmen wir erstmalig an der Berliner Initiative **EnterTechnik** teil. Dabei handelt es sich um ein freiwilliges technisches Jahr, in dem die Teilnehmerinnen bei uns die Bereiche Epitaxie, Prozesstechnik, Feinmechanische Werkstatt und IT durchlaufen.

Im September 2024 waren wir außerdem die Gastgeber für das erste **Green ICT Camp,** das von der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) koordiniert wurde. 50 Studierende erfuhren bei uns mehr über modernste Mobilfunktechnik und lernten gleichzeitig, welche Aspekte die Umweltwirkungen dieser Technologien beeinflussen und wie diese in einer Ökobilanz bewertet werden. (siehe Seite 31)

Inhaltsverzeichnis

Anastasia Schröder vor ihrem Arbeitsplatz, dem Reinraum am FBH.

Darüber hinaus waren wir auch auf weiteren Ausbildungs- und Praktikumsmessen wie der **Kick & Work,** der **Stuzubi Berlin** und der **Vocatium** vertreten.

Im September 2024 bot das Format **Book a Scientist** der Leibniz-Gemeinschaft die Gelegenheit, spannende Einblicke in aktuelle Forschungsthemen zu erhalten. **Tim Schröder** stellte sich den Fragen mit dem Thema: "Technologie mit Glamourfaktor – was Diamanten mit Quantentechnologien zu tun haben".

In der Podcast-Reihe **Weiß der Adler** von FluxFM führt Danilo Höpfner durch den Wissenschafts- und Medienstandort Adlershof. Im März 2024 gab **Markus Krutzik** einen Einblick in die Welt der Quantenforschung. Im September erzählte unsere Auszubildende **Anastasia Schröder,** was ihr an ihrem Job als Mikrotechnologin gefällt.

Inhaltsverzeichnis

Wie Sie uns erreichen

Ferdinand-Braun-Institut gGmbH,

Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Gustav-Kirchhoff-Str. 4

12489 Berlin, Germany

Tel. +49 30 6392-2600

Fax +49 30 6392-2602

E-Mail fbh@fbh-berlin.de

Internet www.fbh-berlin.de

Wissenschaftlicher Geschäftsführer

Prof. Dr.-Ing. Patrick Scheele

Tel. +49 30 6392-2601

patrick.scheele@fbh-berlin.de

Administrative Geschäftsführerin

Dr. Karin-Irene Eiermann

Tel. +49 30 6392-58003

irene.eiermann@fbh-berlin.de

Referentin der Geschäftsführung / Wissenschaftsmanagement

Doreen Friedrich, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH)

Tel. +49 30 6392-3391

doreen.friedrich@fbh-berlin.de

Referentin der Administrativen Geschäftsführerin

Dr. Sabine Spohner

Tel. +49 30 6392-58005

sabine.spohner@fbh-berlin.de

Leiterin der Personalabteilung

Janine Falkenberg, LL. M. (FH)

Tel. +49 30 6392-58217

Janine.falkenberg@fbh-berlin.de

Leiterin der Kommunikationsabteilung

Petra Immerz, M.A.

Tel. +49 30 6392-2626

petra.immerz@fbh-berlin.de

Fachliche Ansprechpersonen für die Forschungsbereiche

Photonik

Prof. Dr.-Ing. Patrick Scheele

Tel. +49 30 6392-2601

patrick.scheele@fbh-berlin.de

III/V-Elektronik

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

Tel. +49 30 6392-2620

wolfgang.heinrich@fbh-berlin.de

Integrierte Quantentechnologie

Dr. rer. nat. Andreas Wicht

Tel. +49 30 6392-3958

andreas.wicht@fbh-berlin.de

III/V-Technologie

Prof. Dr. rer. nat. Markus Weyers

Tel. +49 30 6392-2670

markus.weyers@fbh-berlin.de

Inhaltsverzeichnis

Ferdinand-Braun-Institut gGmbH,

Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Gustav-Kirchhoff-Str. 4

12489 Berlin, Germany

Tel. +49 30 6392-2600

Fax +49 30 6392-2602

E-Mail fbh@fbh-berlin.de

Internet www.fbh-berlin.de

Impressum

Copyright

Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, 06/2025

Alle Rechte, einschließlich des Rechts der Vervielfältigung und Verbreitung, sind vorbehalten.

Redaktion

Petra Immerz, Aiko Onken

Beteiligte Autor*innen (Forschung)

Eldad Bahat Treidel, Olof Bengtsson, Gunnar Blume, Enrico Brusaterra, Alessandro Chillico, Paul Crump, Jonas Hamperl, Oliver Hilt, Katja Höflich, Jan-Philipp Koester, Megha Krishnaji Rao, Reza Mahani, Martin Maiwald, Igor Nechepurenko, Sascha Neinert, Ina Ostermay, Katrin Paschke, Pallabi Paul, Tommaso Pregnolato, Adam Rämer, Jens Raß, Jan Ruschel, Tim Schröder, Kornelius Tetzner, Aleksei Tsarapkin, Domenico Vitali, Andreas Wentzel, Hans Wenzel, Hady Yacoub

Gestaltung

Phil Himmelmann

Fotos

Titelcollage: B. Schurian, M. Baumbach, P. Immerz | Editorial: M. Baumbach | Wertschöpfungskette S. 10/11 (v.l.n.r.): FBH, 3 x B. Schurian, 2 x P. Immerz | M. Baumbach: S. 14, 16, 18, 24, 28, 38, 42, 48 | National Ignition Facility/C. Michel: S. 20 | B. Schurian: S. 22, 34 (u.), 44, 62, 70, 90 (u.) | Fraunhofer Mikroelektronik: S. 26 | N. Vlach: S. 30, 108 (u.) | P. Immerz: S. 40, 50 (o.), 52 (u.), 54 (o. und u.), 58, 64, 88, 90 (o.), 92 (o. re.), 96 (u.), 100 (u.), 110 (u.) | loewn; logulagu GmbH: S. 32 | Freepik: S. 36 | BTU Cottbus-Senftenberg: S. 50 (Mitte) | C. Zimmermann: S. 50 (u.) | A. Onken: S. 52 (o.), 100 (o.) | Wista Management GmbH: S. 54 (Mitte) | S. Neinert: S. 74 | N. Goossen-Schmidt: S. 76 | A. Gjestvang: S. 100 (Mitte) | I. Gerhardt: S. 102 (Mitte | Hensoldt: S. 102 (u.) | Collage S. 106 (v.l.n.r.): N. Vlach, Quantum Valley Lower Saxony (o.), DLR-Fotomedien (u.), S. Klenke | WISTA/N. Morokhova: S. 108 (o.) | ANH Berlin: S. 108 (Mitte)

Grafiken & weitere Fotos

FBH oder privat

Inhaltsverzeichnis