

# PRESSEMITTEILUNG

## Mikrophotonik trifft Mikroelektronik: Atomlagenprozessierung für quantenphotonische Schaltkreise auf Siliziumkarbidbasis

*Siliziumkarbid (SiC) ist ein vielversprechendes Materialsystem für photonische integrierte Schaltungen (PICs) und miniaturisierte Festkörper-Quantensysteme. Im Projekt ALP-4-SiC – Atomlagenprozessierung für SiC für Anwendungen in der Photonik und Quantenkommunikation – entwickeln Forschende des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts (MPL) und des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB gemeinsam Basistechnologien für die Herstellung hocheffizienter photonischer Schaltkreise. Am Beispiel von Lichtwellenleitern und Ringresonatoren wird demonstriert, wie sich mit Hilfe von Atomlagenprozessierung (ALP) die optischen Eigenschaften photonischer Bauelemente aus SiC signifikant verbessern lassen. ALP-4-SiC wird zu 100 % durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Maßnahme „Wissenschaftliche Vorprojekte“ (WiVoPro) gefördert.*

Sie sind der Shootingstar unter den Zukunftstechnologien: Quantensysteme. Vor allem große Hightech-Unternehmen und institutionelle Investoren haben weltweit ein regelrechtes Wettrennen in Gang gesetzt, um Phänomene der Quantenmechanik aus den Forschungslaboren in die breitere praktische Anwendung zu bringen. Insbesondere in der Informationsverarbeitung, Sensorik und Kommunikation zeichnen sich schon heute Umwälzungen ab, die ganze Wirtschaftszweige und Gesellschaften nachhaltig verändern werden.

Technologisch betrachtet lassen sich Quantensysteme am ehesten als eine Kombination von Quantenphysik, Photonik und Elektronik beschreiben. Das populärste Beispiel hierfür ist sicherlich der Quantencomputer. Heutige Quantensysteme erinnern noch sehr an komplizierte opto-elektronische Laboraufbauten und für die Erzeugung, Manipulation und Verarbeitung von Quantenzuständen wird ein immenser technischer Aufwand betrieben. Neben der Komplexität und der schieren Größe ist auch die hierbei notwendige Kühlung ein limitierender Faktor, da viele der aktuell verfügbaren Lösungen erst bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt funktionieren.

Die Integration von Quantentechnologien in marktfähige Produkte und Dienstleistungen verlangt deshalb noch erhebliche Anstrengungen bei der Erforschung und Entwicklung essenzieller Basistechnologien. Ebenso fehlt für eine wirtschaftliche Realisierung praxistauglicher Quantensysteme eine einheitliche und zukunftsichere Materialplattform, welche fundamentale Fortschritte bei Miniaturisierung, Leistungssteigerung und Kostenreduktion zulassen würde.

---

### Wissenschaftlicher Kontakt

Dr. Franziska Beyer | Gruppenleiterin Spektroskopie und Testbauelemente | Tel. +49 3731 2033 103 | [franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de](mailto:franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de)  
Fraunhofer IISB | Schottkystraße 10 | 91058 Erlangen | [www.iisb.fraunhofer.de](http://www.iisb.fraunhofer.de)

## **Robust, anschlussfähig, quantentauglich: Siliziumkarbid als Quanten-Schlüsselmaterial**

Aufgrund seiner besonderen physikalischen Eigenschaften bietet sich das Halbleitermaterial Siliziumkarbid (SiC) als vielversprechende Technologieplattform für Festkörper-Quantensysteme an. SiC ist ein Halbleiter mit großer Bandlücke (englisch Wide-Bandgap, kurz WBG) und hat sich in den vergangenen Jahren vor allem im Bereich der Leistungselektronik etabliert. SiC ist auch sehr attraktiv für die Entwicklung photonischer Mikrosysteme bzw. phototonisch integrierter Schaltungen (englisch Photonic Integrated Circuits, kurz PICs), da sich in diesem Material sowohl optische Bauelemente als auch Lichtquellen und Sensoren herstellen lassen. Zusätzlich ist SiC interessant für nichtlineare optische Effekte, mit denen die Farbe von Laserlicht geändert werden kann, zum Beispiel um Infrarotlicht sehr effizient in sichtbares Licht umzuwandeln. Mit der Möglichkeit der Integration von Punktdefekten in Form sogenannter Farbzentren, die bis zur Raumtemperatur funktionieren, erlaubt SiC perspektivisch sogar die direkte Integration von Quantenfunktionalität. „Damit ist Siliziumkarbid ein Allround-talent für Photonik, Elektronik und Quantenanwendungen, erklärt Dr. Pascal Del’Haye, der den Projektteil am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts leitet.

In SiC wären also alle für den Aufbau leistungsfähiger miniaturisierter Quantensysteme benötigten Elemente abbildbar. Es ist sowohl anschlussfähig an die Mikroelektronik als auch Mikrophotonik und bietet darüber hinaus vollkommen neue quantenelektronische Funktionen. Da SiC kompatibel mit den gut beherrschbaren CMOS-Prozessen der klassischen Siliziumtechnologie ist, würde es sich exzellent für die industrielle Massenproduktion von Quanten-PICs eignen.

## **Die Optimierung erster mikrophotonischer Bauelemente ebnet den Weg zum SiC-Quantenchip**

Bis zum optoelektronischen Quantenchip ist es ein langer Weg und die Forschung steckt hier noch mehr oder weniger in den Kinderschuhen. Für den Aufbau von PICs braucht man zunächst standardisierte mikrophotonische Bauelemente mit geringsten optischen Verlusten. Essenziell sind hierbei Lichtwellenleiter und Ringresonatoren, die Licht in kleinsten Strukturen effizient leiten bzw. speichern können. Während Wellenleiter die Funktion verlustfreier optischer Leitungen übernehmen, bestehen Resonatoren aus winzigen Ringen, in denen das eingespeiste Licht bis zu einer Million Umläufe absolviert. Die damit erzielten Photonenspeicherzeiten erlauben es, diese Bauelemente mit hohen zirkulierenden optischen Leistungen aufzuladen, was eine Vielzahl nichtlinearer optischer Effekte ermöglicht. So können die Mikroresonatoren Laserlicht mit einer bestimmten Wellenlänge in einen optischen Frequenzkamm, also in eine Lichtquelle aus mehreren diskreten Frequenzen, umwandeln, was sich beispielsweise für eine sehr schnelle parallele Datenübertragung in Telekommunikationsnetzen nutzen lässt.

Ein weiterer nützlicher Effekt ist die Wechselwirkung von gegenläufigem Licht. Die nichtlineare optische Einkopplung von gegenläufigem Licht in Ringresonatoren führt zu einer spontanen Symmetrieunterbrechung, die die Lichtzirkulation nur noch in eine Richtung, also im oder gegen den Uhrzeigersinn, zulässt. Hiermit können zum Beispiel chipintegrierte optische Dioden, photonische Schalter oder optische Sensoren realisiert werden, die den Aufbau komplexerer photonischer Systeme ermöglichen.

Allerdings ist die Qualität der auf den SiC-Substraten hergestellten photonischen Bauelementen noch nicht optimal und die relativ hohe Oberflächenrauigkeit verursacht optische Verluste in den Waveguides

---

### **Wissenschaftlicher Kontakt**

Dr. Franziska Beyer | Gruppenleiterin Spektroskopie und Testbauelemente | Tel. +49 3731 2033 103 | [franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de](mailto:franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de)  
Fraunhofer IISB | Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg | [www.iisb.fraunhofer.de](http://www.iisb.fraunhofer.de)

und Resonatoren. Damit die Photonen sich schnell bewegen können und nicht nach außen tunneln, sind fehlerfreie Oberflächen Pflicht. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist die Glättung der Bauelementoberflächen durch atomlagengenaues Ätzen (englisch Atomic Layer Etching, kurz ALE), sodass gut abgegrenzte Trennflächen entstehen und Verlust- und Streuzentren minimiert werden.

### **Brückenschlag zwischen Grundlagenforschung und Prozessentwicklung im Projekt ALP-4-SiC**

Um einen neuartigen Fertigungsprozess für komplexe Photonikbauelemente auf Basis von Siliziumkarbid zu entwickeln, müssen Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Forschung intensiv zusammenarbeiten. Im Projekt ALP-4-SiC – Atomlagenprozessierung für SiC für Anwendungen in der Photonik und Quantenkommunikation – bündeln das MPL in Erlangen und das Fraunhofer IISB mit seinem Standort Fraunhofer-Technologiezentrum Hochleistungsmaterialien THM in Freiberg ihr Knowhow. Das MPL besitzt weitreichende Erfahrungen im Design und bei der Charakterisierung photonischer Bauelemente, während das IISB seine Expertise im Bereich der SiC-Halbleitertechnologie und Atomlagenprozessierung einbringt.

Der neue Ansatz der Integration atomlagen-basierter Prozesse für photonische Bauelemente mit signifikant verbesserten optischen Eigenschaften besitzt ein hohes Potential für die zukünftige Kommerzialisierung integrierter photonischer Bauelemente. Mittelfristig könnten sich vor allem Hersteller von ALE-Prozessanlagen neue Kundenkreise erschließen und im Gegenzug Photonikanbieter mit innovativen Produkten in einem schnell wachsenden Markt positionieren. Die langfristigen Auswirkungen der Verfügbarkeit einer universellen, praxistauglichen, skalierbaren Technologieplattform für integrierte quanten-optoelektronische Schaltungen auf SiC-Basis lassen sich dagegen heute noch gar nicht absehen.

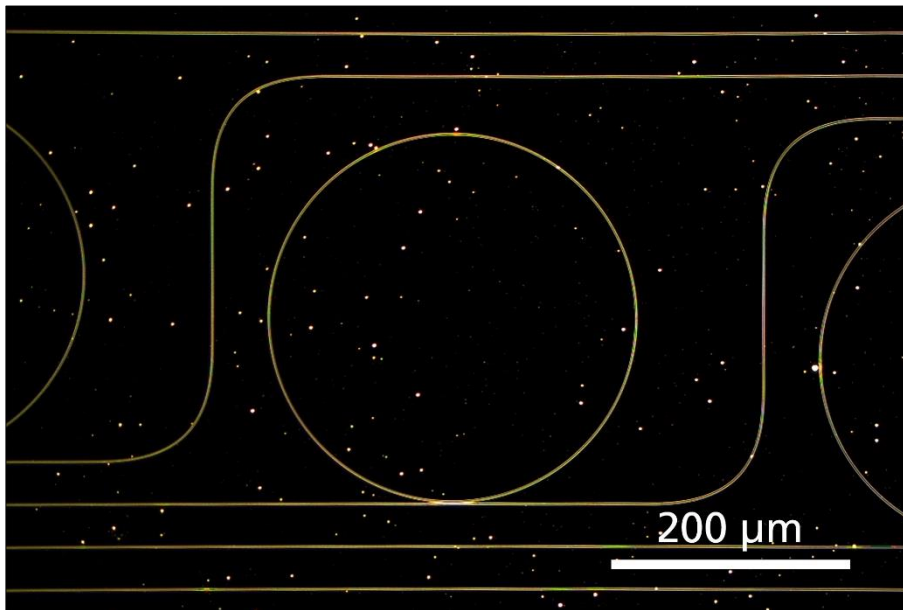


**Reinraummitarbeiter am Fraunhofer THM beim Einlegen eines Wafers in die Transferkammer eines Abscheide- / Ätzclusters für die Strukturierung mittels Atomlagenätzung. © Daniel Karmann / Fraunhofer IISB**

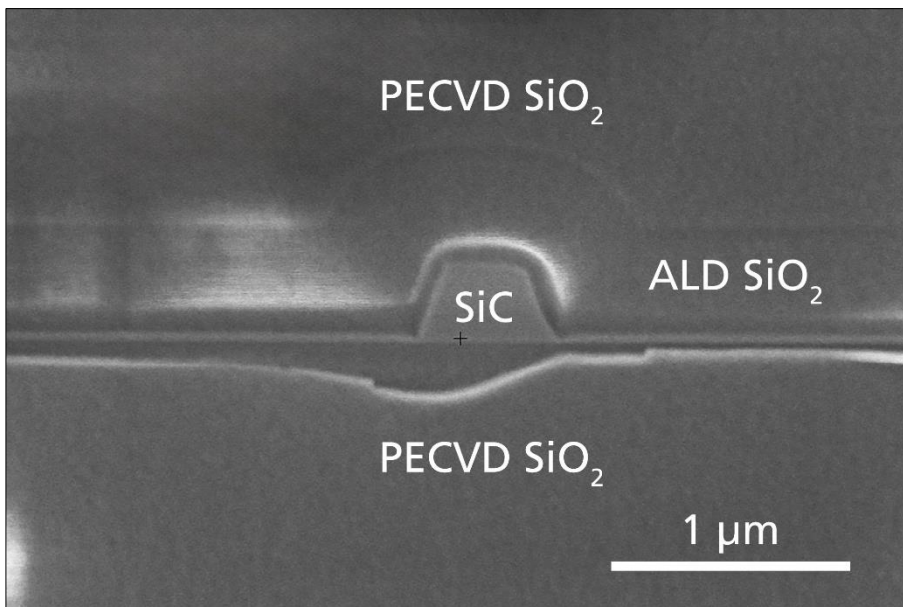
---

#### **Wissenschaftlicher Kontakt**

Dr. Franziska Beyer | Gruppenleiterin Spektroskopie und Testbauelemente | Tel. +49 3731 2033 103 | [franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de](mailto:franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de)  
Fraunhofer IISB | Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg | [www.iisb.fraunhofer.de](http://www.iisb.fraunhofer.de)



Optischer Ringresonator mit  
einem Durchmesser von  
200  $\mu\text{m}$  auf SiC-Substrat  
© Pascal Del'Haye / MPL



Querschnitt einer photonischen  
Struktur in Siliziumkarbid (SiC  
on Insulator, SiOI). © Pascal  
Del'Haye / MPL

#### Wissenschaftlicher Kontakt

Dr. Franziska Beyer | Gruppenleiterin Spektroskopie und Testbauelemente | Tel. +49 3731 2033 103 | [franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de](mailto:franziska.beyer@iisb.fraunhofer.de)  
Fraunhofer IISB | Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg | [www.iisb.fraunhofer.de](http://www.iisb.fraunhofer.de)

## Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL)

Das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL) deckt ein breites Forschungsspektrum ab, darunter nichtlineare Optik, Quantenoptik, Nanophotonik, photonische Kristallfasern, Optomechanik, Quantentechnologien, Biophysik und – in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Zentrum für Physik und Medizin – Verbindungen zwischen Physik und Medizin. Das MPL wurde im Januar 2009 gegründet und ist eines der über 80 Institute der Max-Planck-Gesellschaft, die Grundlagenforschung in den Natur-, Bio-, Geistes- und Sozialwissenschaften im Dienste der Allgemeinheit betreiben.

## Fraunhofer-Technologiezentrum Hochleistungsmaterialien THM

Das Fraunhofer-Technologiezentrum Hochleistungsmaterialien THM in Freiberg, Sachsen, ist eine Forschungs- und Transferplattform des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB und des Fraunhofer-Instituts für Keramische Technologien und Systeme IKTS. Gemeinsam werden Halbleiter- und Energiematerialien in neue Anwendungen überführt und zugleich das stoffliche Recycling berücksichtigt und entwickelt. Schwerpunkte der Arbeiten am Fraunhofer THM sind die Analyse und Entwicklung von nachhaltigen Batteriesystemen mit verbesserter Ökobilanz und Rohstoffverfügbarkeit sowie die Erforschung und Evaluierung innovativer Halbleiterbauelemente und der dazugehörigen Prozessschritte.

## Förderhinweis

Das Projekt ALP-4-SiC – Atomlagenprozessierung für SiC für Anwendungen in der Photonik und Quantenkommunikation – wird im Rahmen des Programms „Wissenschaftliche Vorprojekte (WiVoPro)“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert.

Die vom BMFTR mit dieser Maßnahme finanzierten Projekte untersuchen wissenschaftliche Fragestellungen mit Blick auf künftige industrielle Anwendungen. Sie können von bis zu zwei Forschungseinrichtungen durchgeführt werden und sollen die Lücke zwischen Grundlagenforschung und industriegeführter Verbundförderung schließen.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

---

### Pressekommunikation

Thomas Richter | Kommunikation | Tel. +49 9131 761 158 | [thomas.richter@iisb.fraunhofer.de](mailto:thomas.richter@iisb.fraunhofer.de)  
Fraunhofer IISB | Schottkystr. 10 | 91058 Erlangen | [www.iisb.fraunhofer.de](http://www.iisb.fraunhofer.de)

Das **Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB** zählt zu den führenden europäischen Forschungseinrichtungen für Wide-Bandgap-Halbleiter und leistungselektronische Systeme. Dabei bedient es die vollständige Wertschöpfungskette der Leistungselektronik. Das Spektrum reicht von Grundmaterialien über Halbleiterbauelemente und Prozesstechnologien, leistungselektronische Module und Komponenten bis zu kompletten Elektronik- und Energiesystemen. Zentrale Anwendungsfelder sind Elektromobilität, Luft- und Raumfahrt, nachhaltige Energieversorgung und zivile Sicherheit. Mit seinen Lösungen setzt das Institut immer wieder Benchmarks in Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit, auch für extreme Betriebsbedingungen. Die Integration intelligenter datenbasierter Funktionalitäten erschließt dabei kontinuierlich neue Anwendungsszenarien. So unterstützt das IISB weltweit Kunden und Partner, aktuelle Forschungsergebnisse in wettbewerbsfähige Produkte zu transferieren. Ca. 400 Mitarbeitende sind an den Standorten des IISB tätig: dem Hauptsitz in Erlangen, dem E|Road-Center im Cleantech Innovation Park in Hallstadt und dem Fraunhofer-Technologiezentrum Hochleistungsmaterialien THM in Freiberg.

Pressemitteilungen des Fraunhofer IISB sind online verfügbar unter: [www.iisb.fraunhofer.de/presse](http://www.iisb.fraunhofer.de/presse).  
Dort finden Sie auch das Bildmaterial zur redaktionellen Verwendung sowie die englischsprachige Version der Pressemitteilung.