

Presseinformation

19. Mai 2026

Seite 1 | 5

Mit Laserprozessen zu miniaturisierten, robusten Strahlquellen für die Quantentechnologie

Ein Konsortium aus Industrie und Forschung hat im Projekt »HiPEQ« neue laserbasierte Ansätze entwickelt, um miniaturisierte robuste Strahlquellen für Quantentechnologie-Anwendungen zu realisieren. Unter anderem gelang es mithilfe von Lasern neuartige Isolator-Kristalle zu züchten. Das mit 6,22 Mio. € vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderte Projekt hat in der Laufzeit von November 2021 bis Juli 2025 weitere beachtliche Fortschritte erzielt. Das Fraunhofer ILT in Aachen konnte maßgeblich dazu beigetragen.

Noch sind Strahlquellen für Quantentechnologie-Anwendungen oft komplex, groß und zu wenig robust für den Einsatz im Feld. Dafür bedarf es miniaturisierter und möglichst flexibel einsetzbarer Systeme. Eine solche Strahlquelle hat das BMFTR-Förderprojekt »HiPEQ – Hochintegrierte PIC-basierte ECDLs für die Quantentechnologie« entwickelt.

Koordiniert vom späteren Systemintegrator TOPTICA hat ein Konsortium aus Industrie und Forschung Demonstratoren von zwei miniaturisierten Strahlquellen aufgebaut. Bei nur 22 x 9 x 6 cm³ Außenmaß bieten sie Raum für alle Systemkomponenten. Das Konzept ist zudem auf andere Wellenlängen erweiterbar. Sie sind also in einem breiten Spektrum an quantentechnologischen Anwendungen einsetzbar.

Das Fraunhofer ILT konnte im Projekt maßgeblich zur erfolgreichen Zucht bisher nicht verfügbarer Kristalle für neuartige Faraday-Isolatoren beitragen. In einem zweiten Arbeitspaket haben die Aachener ein gläsernes Packaging-Modul mit µm-genauen Halterungen für wichtige Systemkomponenten und für die Faserkopplung realisiert.

Kompakt, robust und flexibel einsetzbar

Die Lasersysteme basieren auf photonisch integrierten Schaltkreisen (PICs), Lichtleitern, einer Faserkopplung und einem optischen Isolator, der Rückreflexe der Strahlung in den Laser abschirmt. Diese Schlüsselkomponente basiert auf speziellen Kristallen, die den magnetooptischen Faraday-Effekt zeigen: Wird ein Magnetfeld angelegt, dreht sich im Kristall die Polarisationsebene einfallender Lichtwellen. Durch diese Faraday-Rotation kann reflektiertes Licht – wenn überhaupt – dann nur extrem gedämpft zur Strahlquelle zurückgelangen. Auf diese Weise wenden Isolatoren Schäden ab und sorgen für jene Schmalbandigkeit der Laser, die für Quantentechnologie-Anwendungen essenziell ist. Bisher basieren Faraday-Isolatoren meist auf Terbium-Gallium-Granat (TGG), das bei sichtbarem und nah-infrarotem Licht eine hohe Verdet-Konstante aufweist; diese gibt die Stärke des Faraday-Effekts an. »TGG-Isolatoren haben üblicherweise eine Länge von etwa 25 Millimetern«, berichtet Florian Rackerseder, der Projektverantwortliche des Fraunhofer ILT. Für die Miniaturisierung seien Kristalle mit höherer

Verdet-Konstante gefragt, die die Abschirmung auf weniger Bauraum leisten. Diese Kristalle für Faraday-Isolatoren habe man im HiPEQ-Projekt gezüchtet und erprobt.

19. Mai 2026

Seite 2 | 5

Die Wahl fiel auf ein Material basierend auf dem in der Natur nicht vorkommenden Terbium-(III)-Oxid (Tb_2O_3). Es hat eine dreimal höhere Verdet-Konstante als TGG und ist besonders für Laser im blauen Wellenlängenbereich geeignet, für die es bisher kein geeignetes Material gab. » Tb_2O_3 monokristallin zu züchten, ist eine Herausforderung«, erläutert der Experte, »weil bei Schmelztemperaturen jenseits von 2.500 °C präzise Temperaturgradienten beim Übergang in die stabile Phase einzuhalten sind«. Gemeint ist der Übergang vom geschmolzenen keramischen Ausgangsmaterial zum Tb_2O_3 -Kristall. Die Abkühlraten sind entscheidend für die Qualität des Kristalls; der Prozess ist derart sensibel, dass es mit konventionellen Methoden der Kristallzucht bisher nie gelang, Tb_2O_3 in der für Isolatoren erforderlichen Größe und Qualität herzustellen. Um die kubische Phase, in der das Material gezüchtet wird, zu stabilisieren, und dadurch den Züchtungsprozess zu vereinfachen, wurde eine Co-Dotierung mit Lutetiumoxid (Lu_2O_3) eingesetzt.

Lasertechnik als Schlüssel für Züchtung hochreiner Kristalle

In einem HiPEQ-Teilprojekt haben SurfaceNet, Laserline und das Fraunhofer ILT eine neue Anlage entwickelt und realisiert, in der $(Tb_xLu_{1-x})_2O_3$ -Isolator-Kristalle im so genannten laserbasierten optischen Floating-Zone-Verfahren (LOFZ) heranwachsen. Der Übergang von der geschmolzenen Keramik zum Kristall findet am Rand der Floating-Zone statt, auf die rundum vier Bearbeitungsoptiken gerichtet sind. Diese lenken die Strahlung von vier Diodenlasern mit je 3 kW maximaler optischer Leistung auf den keramischen Nährstab und schmelzen ihn zum Einkristall um.

Die in Simulationen optimierte Bestrahlung mit trapezförmigen, äußerst homogenen Strahlprofilen gewährleistet gleichmäßige Heizleistungsdichten in der Floating-Zone. Die Intensitätsverteilung im Fokus ist über Anpassungen im Strahlengang einstellbar. »Die trapezförmige Geometrie bietet den Vorteil, dass ein Großteil der eingebrachten Laserenergie die Keramik aufschmilzt und der Rest die Temperatur beim Erstarren zum Kristall reguliert«, erklärt Rackerseder. In dem kontinuierlichen Umschmelzprozess mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit dürfe der Kristall den Temperaturbereich nahe dem Schmelzpunkt nur mit exakt spezifizierten Abkühlraten verlassen. Das Team konnte diese Anforderung mithilfe des präzise gesteuerten LOFZ-Verfahrens erfüllen. »Wir sind damit erstmals in der Lage, $(Tb_xLu_{1-x})_2O_3$ -Isolator-Kristalle in der geforderten Größe und Qualität herzustellen«, erklärt er.

Vollständig integriertes System

Die neuen Isolator-Kristalle hat das HiPEQ-Konsortium in einem weiteren Teilprojekt in modulare miniaturisierte Strahlquellen integriert. Auch hierzu hat das Fraunhofer ILT maßgeblich beigetragen. Es hat einen individuell an verschiedene Systemauslegungen adaptierbaren Faser-Chip-Koppler konstruiert und diesen aus Glas gefertigt. Die nötige Flexibilität und Präzision erreichte das Team mithilfe des Selektiven Laser-induzierten Ätzens (SLE): Ein Laser belichtet Mikrostrukturen in Glas, die sich danach präzise herausätzen lassen. Das ermöglicht es, komplex geformte Hohlräume im Innern von Glas zu realisieren. In dem Projekt war diese individuelle Formgebung des SLE-Verfahrens der Schlüssel dazu, beide Strahlquellen mit Wellenlängen von 461 nm (blau) und 637 nm (rot) jeweils monolithisch fertigen zu können, obwohl Komponenten unterschiedlicher Abmessungen darin verbaut sind. Der Faraday-Isolator ist ebenso passgenau integriert, wie die flexibel für die jeweiligen Faserdurchmesser auslegbare

Schnittstelle vom PIC zu den Lichtleitern samt Ein- und Auskopplungsoptiken und Strahlteilern. Der SLE-Prozess gewährleistet die μm -genaue Einpassung der jeweils unterschiedlichen Module beider Demonstratoren.

19. Mai 2026

Seite 3 | 5

»Dass das umliegende Material denselben Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist wie die optischen Komponenten, macht den Faser-Chip-Koppler robuster gegenüber Temperaturschwankungen«, erklärt Sandra Borzek, die Verantwortliche für diesen Teil des Projekts am Fraunhofer ILT. Hierbei verbieten sich angesichts der hohen Präzisionsanforderungen Spannungen infolge unterschiedlicher Materialausdehnung. Und es gab noch einen weiteren Treiber für den Projekt-Ansatz: »Bislang werden die Laserstrahlquellen für die Quantentechnologien meist manuell justiert«, erklärt sie. Jede Komponente von den Optiken über die Isolatoren und Strahlteiler bis zu den Fasern mit einstelligen μm -Durchmessern werde individuell eingesetzt und ausgerichtet.

Das Ziel: Minimierter Justage- und Montageaufwand

Die Photonik sucht Lösungen, die den Montage- und Justage-Aufwand minimieren und die geforderte Präzision weitgehend automatisch einhalten. Das monolithisch in einem einzigen SLE-Prozess gefertigte Packaging-Modul kommt dem schon nahe. Im Idealfall dient es nach der Bestückung mit den optischen Komponenten als fixe Baugruppe, die sich mithilfe des so genannten Flip-Chip-Bondings an den PIC anbinden lässt.

Ursprünglich wollte das SLE-Team die Optiken zum Ein- und Auskoppeln des Lichts im SLE-Prozess mitfertigen und per Laser polieren. Doch die Politur der Linsen im Bauteil war unmöglich und ihre Oberfläche nach dem SLE-Prozess zu rau. »Wir haben deshalb verschiedene Lösungsansätze entwickelt, um Artefakte und Restwelligkeiten auf den Oberflächen zu eliminieren. So sind wir auch dem Ziel integrierter Optiken und deren Politur ein großes Stück nähergekommen«, berichtet Borzek. Das Team entschied, die Optiken im SLE-Prozess ohne feste Anbindung an den monolithischen Glaskörper mit herzustellen. So lassen sie sich zum Polieren entnehmen und anschließend exakt dort einsetzen, wo sie entnommen wurden.

HiPEQ hat Know-how für künftige Strahlquellen generiert

Mit der erfolgreichen Züchtung der $(\text{Tb}_x\text{Lu}_{1-x})_2\text{O}_3$ -Isolator-Kristalle, der optimierten Prozessstrategie für die SLE-basierte Optikfertigung und der Direktintegration der mikroskopischen Kopplungsstrukturen ins makroskopische Gehäuse hat HiPEQ wichtige Meilensteine erreicht. Das Konsortium hat das nötige Know-how generiert, um flexible Systemauslegungen mit verschiedenen Isolatoren mit deutlich reduziertem Montage- und Justage-Aufwand umsetzen zu können. »Auf dieser Basis könnten die gläsernen Packaging-Module für flexible Systemauslegungen künftig im SLE-Prozess binnen Tagen μm -genau hergestellt werden. Die neuartigen Faraday-Isolatoren sind eine Schlüsseltechnologie für die weitere Miniaturisierung«, sind Borzek und Rackerseder überzeugt. HiPEQ habe damit wichtige Beiträge zur Robustheit, Vielseitigkeit und zum reduzierten Justage-Aufwand von Lasern für quantentechnologische Anwendungen geleistet.

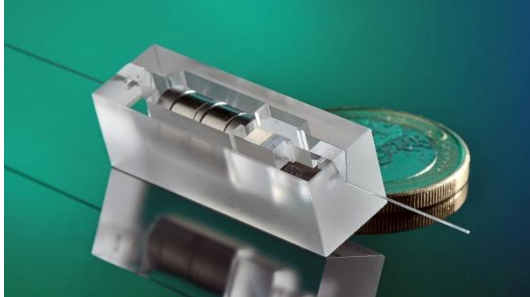


Bild 1:

Das im BMFTR-Förderprojekt HiPEQ entwickelte, im SLE-(Selektives Laser-induziertes Ätzen)-Prozess gefertigte Packaging-Modul integriert Optiken, Isolator und Strahlteiler auf engstem Bauraum und unterstützt deren μm -genaue Ausrichtung.

© Fraunhofer ILT, Aachen.

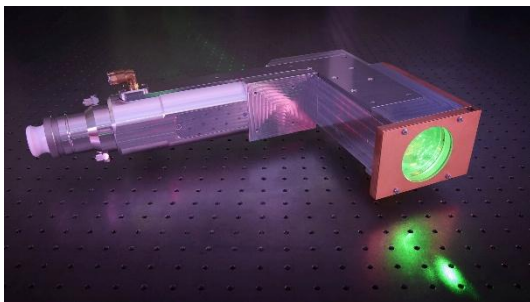


Bild 2:

Im laserbasierten optischen Floating-Zone-Verfahren (LOFZ) lenken vier solcher am Fraunhofer ILT entwickelten Bearbeitungsoptiken die Strahlung von vier Diodenlasern mit je 3 kW maximaler optischer Leistung auf den keramischen Nährstab und schmelzen ihn zum Einkristall um. Die Optiken gewährleisten am Übergang von der geschmolzenen Keramik zum Kristall gleichmäßige Heizleistungsdichten.

© Fraunhofer ILT, Aachen / Ralf Baumgarten.

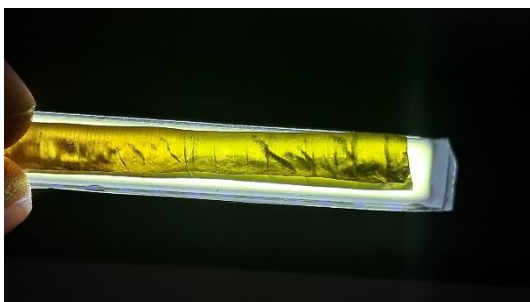


Bild 3:

Für neuartige Faraday-Isolatoren bedarf es spezieller Kristalle in der erforderlichen Größe und Qualität. Erstmals überhaupt konnten die Projektpartner des HiPEQ-Konsortiums neuartige mit Lutetiumoxid co-dotierte Terbium-(III)-Oxid-Kristalle züchten.

©SurfaceNet.



19. Mai 2026

Seite 5 | 5

Bild 4:

Auf einer solchen SLE-Anlage des assoziierten Projektpartners LightFab GmbH konnte das Team des Fraunhofer ILT das Packaging-Modul in der erforderlichen Präzision fertigen.

© Fraunhofer ILT, Aachen / Ralf Baumgarten.

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Im Innovationsprozess spielt sie eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein.

Mehr als 30 000 Mitarbeitende an 74 Instituten und selbstständigen Forschungseinrichtungen in Deutschland erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,2 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung.

Kontakt

Fachliche Ansprechpersonen

Florian Rackerseder M. Sc.

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Gruppe Optikdesign und Diodenlaser
Tel. +49 241 8906-8012

florian.rackerseder@ilt.fraunhofer.de

Sandra Borzek M. Sc.

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Strukturierung transparenter Materialien

Tel. +49 241 8906-459

sandra.borzek@ilt.fraunhofer.de

Pressekontakt

Petra Nolis

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Kommunikation

Gruppenleitung

Tel. +49 1714115001

petra.nolis@ilt.fraunhofer.de

www.ilt.fraunhofer.de

