

Ein Netzwerk aus Diamanten

Silizium-Fehlstellen-Farbzentren in Diamant-Mikrostrukturen ermöglichen integrierte Quantennetzwerke.

Effiziente Schnittstellen zwischen einzelnen Photonen und einzelnen Quantensystemen sind eine Grundvoraussetzung, um Systeme zur Quanteninformationsverarbeitung zu konstruieren. Insbesondere die Entwicklung integrierter Quantennetzwerke, in denen mehrere Quantenbits (Qubits) innerhalb eines kompakten Chips interagieren, ist aufgrund der schwachen Licht-Materie-Wechselwirkung schwierig. Die etablierten Fabrikationsprozesse der meisten festkörperbasierten Quantensysteme führen dazu, dass die Qubits im Chip zufällig verteilt sind. Zudem bewirken Verspannungen oder Inhomogenitäten im Wirtsmaterial oft breite inhomogene Verteilungen optischer Übergangsfrequenzen – beides verhindert eine kontrollierte Kopplung mehrerer räumlich getrennter Qubits.

Einem internationalen Team unter Führung von Wissenschaftlern der Harvard University gelang es nun, eine vielversprechende Plattform für integrierte Quantennetzwerke zu entwickeln, welche die oben genannten Probleme weitgehend löst [1]. Als Quantensystem nutzen sie das Silizium-Fehlstellen-Farbzentrum (Silicon-Vacancy Center, SiV) in Diamant.

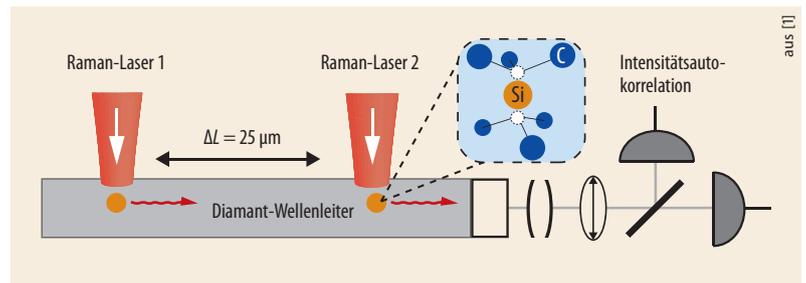


Abb. 1 Senkrecht zum Wellenleiter regt ein Raman-Laser ein SiV an. Im Abstand von 25 μm folgt eine zweite Raman-Anregung, am Ende die Messung der In-

tensitätsautokorrelation. Das Inset illustriert die molekulare Struktur des Silizium-Fehlstellen-Farbzentrums.

Dabei handelt es sich um einen optisch-aktiven atomaren Defekt im Diamantgitter, bei dem ein Siliziumatom und eine Gitterfehlstelle zwei benachbarte Kohlenstoffatome ersetzen (Inset in Abb. 1). Die inversionssymmetrische Struktur des SiV ist besonders vorteilhaft. Sie führt nämlich dazu, dass das Zentrum kein permanentes Dipolmoment besitzt und daher kein linearer Stark-Effekt oder Verschiebungen der Spektrallinien aufgrund von Verspannungen im Kristall auftreten. Daher weisen SiVs eine für festkörperbasierte Emittoren außergewöhnlich schmale spektrale Verteilung auf [2]. Zudem bietet das SiV aufgrund seiner großen Grundzustandsaufspaltung von 48 GHz die Möglichkeit der kohärenten Kontrolle mittels ultrakurzer Laser-

pulse [3]: In integrierten Multi-Qubit-Systemen ist es unerlässlich, einzelne Emittoren extrem schnell und ortsaufgelöst kontrollieren zu können.

Um die von Natur aus schwache Wechselwirkung zwischen Photonen und SiVs zu verstärken, integrieren die Wissenschaftler die Farbzentren in nanophotonische Wellenleiter- und Resonator-Strukturen, die sie durch eine spezielle reaktive Ionenätzmethode direkt im Diamant fabrizieren.

Für eine effiziente Kopplung einzelner Quantenemittoren an diese nanophotonischen Strukturen müssen Emittoren und optische Mode mit einer Genauigkeit überlappen, die deutlich besser ist als die Emissionswellenlänge im Material (rund 300 nm). Das erfordert eine deterministische Erzeugung einzelner Farbzentren mit hoher Auflösung. Die Autoren erreichen dies durch eine neue Ionenimplantationsmethode mittels eines fokussierten Si^+ -Ionenstrahls. Sie erlaubt es, Silizium-Fehlstellen-Farbzentren mit einer Effizienz von zwei bis drei Prozent und mit einer bislang unerreichten Ortsauflösung von bis zu 40 nm zu erzeugen.

Auf diese Weise erreichten die Wissenschaftler eine effiziente Kopplung der Silizium-Fehlstellen-Farbzentren (Kooperativität $C \approx 1$)¹⁾ an hochqualitative Nanoresonatoren mit einem Gütefaktor von $Q \approx 7200$. Die so erhaltenen Emittoren-Resonator-Systeme zeigen eine starke Nichtlinearität bis hinab

1) Anschaulich ist die Kooperativität C das Inverse der kritischen Zahl von Atomen, die nötig sind, um einen merklichen Einfluss auf die Transmission in einem gekoppelten Emittoren-Resonator-System zu erzielen.

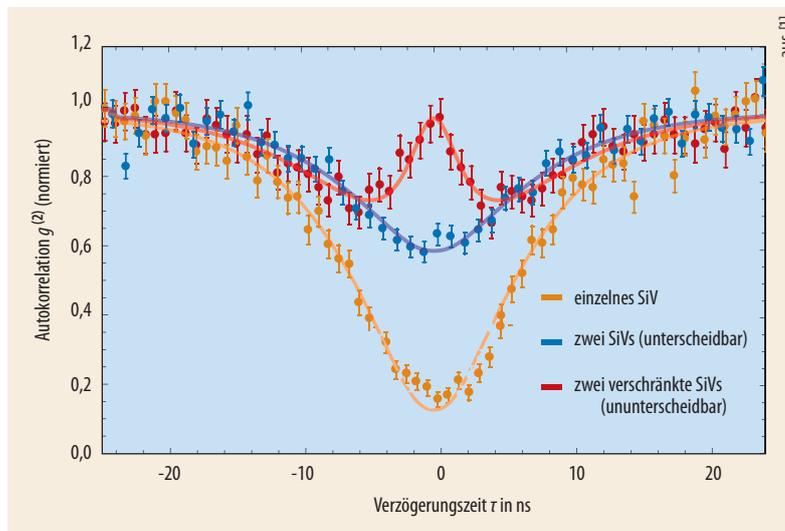


Abb. 2 Die Intensitätsautokorrelation $g^{(2)}$ der Raman-Photonen eines einzelnen SiV (gelb) und zweier unterscheid-

barer SiVs (blau) zeigen einen Einbruch, der sich bei zwei verschränkten SiVs (rot) umkehrt.

zum Einzelphotonenniveau. Mit Hilfe der verstärkten Licht-Materie-Wechselwirkung gelang es, den Prototyp eines optischen Schalters zu realisieren: Ein klassischer Gate-Lichtpuls präpariert das SiV in einem internen Zustand, der die Transmission eines Testpulses kontrolliert. Dieser Effekt funktioniert auch als Quantenschalter für einzelne Photonen, wie die Analyse von Intensitäts-Autokorrelationsfunktionen der Photonen zeigt, die deren zeitliche Verteilung beschreibt.

Eine weitere Voraussetzung für integrierte Quantennetze ist die quantenmechanische Verschränkung mehrerer Qubits innerhalb einer Struktur. Das SiV ist hierfür ein guter Kandidat, jedoch ist auch dieses nicht vollkommen immun gegenüber Verspannungen im Diamant, die in Nanostrukturen oft stärker ausgeprägt sind. Dadurch sind die Emissionsfrequenzen über mehrere Linienbreiten verteilt, was eine direkte Kopplung von Silizium-Fehlstellen-Farbzentren durch spontan emittierte Photonen verhindert.

Damit mehrere Emittier interagieren können, erzeugten die Autoren Einzelphotonen mittels Raman-Übergängen. Eine Variation der Laserwellenlänge relativ zur SiV-Resonanz erlaubt es dann, die Frequenz des emittierten Raman-Photons gezielt zu ändern. Die Anregung erfolgt senkrecht zum

Wellenleiter, die Emission des Raman-Photons in den Wellenleiter hinein (Abb. 1). Dies erhöht die Effizienz des Prozesses zusätzlich. Mit dieser Technik gelang es, zwei Silizium-Fehlstellen-Farbzentren zu verschränken: Da die Detektion eines einzelnen Photons am Wellenleiterende keinen Rückschluss darauf zulässt, welches SiV es emittiert hat, projiziert das Ereignis die Qubits in einen verschränkten Zustand. Dieser sog. Zweiteilchen-Dicke-Zustand ist superradiant, er emittiert also ein zweites Raman-Photon mit der doppelten Rate des Einteilchen-Zustands. Dies dient zum Nachweis der Verschränkung durch Messung der Intensitätsautokorrelation der emittierten Photonen (Abb. 2).

Wird ein einzelnes SiV angeregt, zeigt die Autokorrelation den charakteristischen Einbruch (ideal $g^{(2)}(0) = 0$) bei einer Verzögerungszeit $\tau = 0$. Anschaulich bedeutet dies, dass ein einzelnes Quantensystem nie zwei Photonen zur selben Zeit emittieren kann. Werden beide SiVs ohne Kompensation ihrer Frequenzunterschiede angeregt, erreicht die Autokorrelation einen Wert von nur etwa $g^{(2)}(0) = 0,5$. Dies entspricht der Grenze für zwei unabhängige Einzelphotonen-Emitter. Sind die Photonen beider Emitter hingegen ununterscheidbar, so verschwindet der Einbruch bei $\tau = 0$ praktisch vollständig. Die-

ser Interferenzeffekt ist eine Folge der Superradianz des verschränkten Zustands.

Demnach eignen sich Farbzentren mit Inversionssymmetrie (beispielsweise auch auf Basis von Germanium [4]), um integrierte Festkörper-Quantentechnologien zu realisieren. Der Weg hin zu einer einsatzbereiten Technologie ist jedoch noch weit. So ist beispielsweise die Kohärenzzeit interner Zustände der Silizium-Fehlstellen-Farbzentren bei 4 K durch Phononenwechselwirkungen auf lediglich 40 ns begrenzt [5, 6] – ein Wert, der sich künftig bei noch tieferen Temperaturen um 300 mK weiter verbessern lassen sollte. Für eine vollständig skalierbare Plattform ist es zudem nötig, Farbzentren effizienter zu erzeugen, um auch mehr als zwei Emittier innerhalb einer Struktur reproduzierbar fabrizieren zu können.

Jonas N. Becker und Christoph Becher

- [1] A. Sipahigil et al., *Science* **354**, 847 (2016)
- [2] C. Hepp et al., *Phys. Rev. Lett.* **112**, 03640 (2014)
- [3] J. N. Becker et al., *Nat. Commun.* **7**, 13512 (2016)
- [4] T. Iwasaki et al., *Sci. Rep.* **5**, 12882 (2015).
- [5] B. Pingault und J. N. Becker et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 263601 (2014)
- [6] L. Rogers et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 263602 (2016)

Jonas N. Becker,
M.Sc. und Prof. Dr.
Christoph Becher,
Experimentalphysik,
Universität des Saarlandes,
Campus E2.6,
66123 Saarbrücken

ALLES GOLD, WAS GLÄNZT?

Die gelblich glänzende Farbe von Gold entsteht durch die Absorption blauer Frequenzen. Ursache ist eine ungewöhnlich kleine Energielücke zwischen den 6s- und 5d-Orbitalen der Atome, die sich mithilfe relativistischer Effekte erklären lässt. Diese entstehen durch das starke Coulomb-Potential des schweren Atomkerns. Jahrzehntlang führten die relativistischen Effekte dazu, dass theoretische Vorhersagen die experimentellen Werte der Ionisationsenergie und Elektronenaffinität von Gold deutlich unterschätzten. Fünf Theoretikern gelang es nun, die Abweichungen auf wenige Millielektronenvolt zu reduzieren. Dazu leiteten sie die Beiträge der Korrelationen zwischen vier und fünf Elektronen her und bauten sie in die bestehenden Modelle ein. (KS)
L. F. Pašćeka et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 023002 (2017)



M. Dörfler & M. Frommherz