

PRESSEMITTEILUNG

Neues Quasiteilchen überbrückt Mikrowellen- und optische Bereiche

18.09.2023

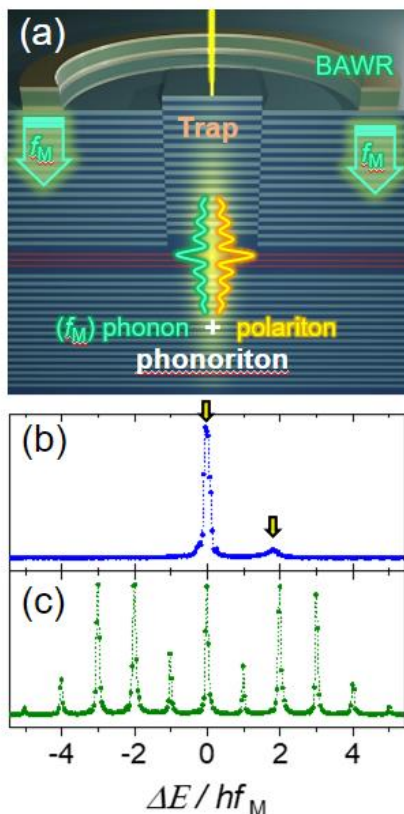
In der heute veröffentlichten Arbeit in *Nature Communications* haben Forscher des Paul-Drude-Instituts in Berlin und des Instituto Balseiro in Bariloche, Argentinien, gezeigt, dass die Vermischung von begrenzten Quantenflüssigkeiten aus Licht und GHz-Schall zur Entstehung eines schwer fassbaren Phonoriton-Quasiteilchens führt, das zum Teil ein Lichtquant (Photon), ein Schallquant (Phonon) und ein Halbleiter-Exziton ist. Diese Entdeckung eröffnet einen neuartigen Weg zur kohärenten Umwandlung von Informationen zwischen optischen und Mikrowellenbereichen, was potenzielle Vorteile für die Bereiche Photonik, Optomechanik und optische Kommunikationstechnologien mit sich bringt.

Die Arbeit des Forscherteams ist von einem alltäglichen Phänomen inspiriert: Die Energieübertragung zwischen zwei gekoppelten Oszillatoren, wie z. B. zwei durch eine Feder verbundene Pendel [1]. Unter bestimmten Kopplungsbedingungen, die als starker Kopplungszustand (SC) bezeichnet werden, schwingt die Energie kontinuierlich zwischen den beiden Pendeln, die nicht mehr unabhängig sind, da ihre Frequenzen und Abklingraten nicht denen der ungekoppelten Pendel entsprechen. Bei den Oszillatoren kann es sich auch um photonische oder elektronische Quantenzustände handeln: Der SC-Zustand ist in diesem Fall von grundlegender Bedeutung für die Kontrolle und den Austausch von Quantenzuständen.

Im obigen Beispiel wird davon ausgegangen, dass die beiden Pendel die gleiche Frequenz haben, d. h. in Resonanz sind. Hybride Quantensysteme erfordern jedoch eine kohärente Informationsübertragung zwischen Oszillatoren mit sehr unterschiedlichen Frequenzen. Ein wichtiges Beispiel hierfür sind Netzwerke von Quantencomputern. Während die vielversprechendsten Quantencomputer mit Mikrowellen-Qubits (d. h. bei einigen GHz) arbeiten, wird die Quanteninformation effizient mit Photonen im nahen Infrarot (100^{ds} THz) übertragen. Man benötigt also eine bidirektionale und kohärente Übertragung von Quanteninformation zwischen diesen Bereichen. Die direkte Umwandlung zwischen Mikrowellen-Qubits und Photonen ist in vielen Fällen sehr ineffizient. Hier besteht eine Alternative darin, die Umwandlung durch ein drittes Teilchen zu vermitteln, das sowohl an die Mikrowellen-Qubits als auch an die Photonen effizient koppeln kann. Ein guter Kandidat sind GHz-Schwingungen des Gitters (Phonon).

Die theoretischen Grundlagen für den SC zwischen Licht und Phononen wurden 1982 von Keldysh und Ivanov [2] gelegt, die vorhersagten, dass Halbleiterkristalle Photonen und Phononen über ein weiteres Quasiteilchen mischen können: das Exziton-Polariton (im Folgenden: Polariton). Polaritonen entstehen durch die starke Kopplung zwischen Photonen und Exzitonen. Wenn ein Phonon ins Spiel kommt, kann es zwei Polariton-Oszillatoren

koppeln, deren Frequenzen sich genau um die Frequenz des Phonons unterscheiden. Wenn die Kopplung groß genug ist, d. h. im SC-Bereich, führt sie zur Bildung eines neuen Quasiteilchens - des Phonoritons, das eine Mischung aus einem Exziton, einem Photon und einem Phonon ist. Aufgrund der strengen experimentellen Anforderungen für die Entstehung von Phonoritonen gibt es jedoch nur sehr wenige Berichte über die Bildung von Phonoritonen [3]. Abgesehen von der wissenschaftlichen Bedeutung der Entdeckung dieser neuen grundlegenden Halbleiteranregung kann das Phonoriton ein neues vielversprechendes Zwischenprodukt für die kohärente Frequenzumwandlung von Mikrowellen in optische Signale sein.



(a) A sketch of a microcavity. The thicker region is the trap for phonons and polaritons. BAWR – is the piezoelectric transducer. Panels (b) and (c) show emission spectra of the phonoriton in the trap for BAWR Off and On, respectively. The small yellow arrows in (b) designate phonoriton peaks.

In ihrer Arbeit erzeugten Kuznetsov et al. Polaritonen in einem gemusterten Mikrokavitätsresonator, des in Abb. 1(a) gezeigten Typs. Die mikrometergroßen, dickeren Bereiche innerhalb des Mikrokavitätsresonators wirken als hybride Fallen sowohl für 370-THz-Polaritonen als auch für Phononen mit 5 bis 20 GHz. Die Fallen verstärken die Wechselwirkung zwischen den beiden Teilchen um ein Vielfaches, was eine wichtige Voraussetzung für die Bildung von Phonoritonen ist. Durch optische Injektion weiterer Polaritonen in die Falle erzeugte das Team zwei Polaritonenkondensate, die sich durch eine sehr helle und spektral schmale (Sub-GHz) Emissionslinie auszeichnen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Lasern haben Polaritonen starke Wechselwirkungen zwischen den Teilchen, was ihnen den Namen "Quantenflüssigkeiten" des Lichts einbrachte. Aufgrund dieser Wechselwirkungen kann die Energieaufspaltung zwischen den beiden Lichtflüssigkeiten durch Steuerung ihrer Dichten mit einem externen Laser genau eingestellt werden. Wenn die Energieaufspaltung mit der Phononenenergie übereinstimmt, synchronisieren sich die beiden Polaritonenflüssigkeiten, siehe Abb. 1(b). Die Synchronisation ist auf eine Kombination aus nichtlinearen Polariton-Polariton-Wechselwirkungen und dem effizienten Transfer von Polaritonen zwischen den Lichtflüssigkeiten zurückzuführen, der durch die Absorption und Emission von Phononen vermittelt wird. Es zeigt sich, dass die phononeninduzierte Kopplung zwischen Polariton-Zuständen deren Zerfallsrate übersteigt, was die Entstehung des Phonoritons markiert.

Die Autoren verwendeten einen piezoelektrischen Wandler, der auf der Mikrokavität und um die Falle herum hergestellt wurde, um das Gerät mit Mikrowellen zu steuern und 7-GHz-Phononen in die Falle zu injizieren [4]. In Gegenwart der injizierten Phononen verwandelt sich das Phonoritonenspektrum in einen Kamm aus schmalen Resonanzen (oder Phononenseitenbändern), wie in Abb. 1(c) gezeigt. Die Seitenbänder links (rechts) vom zentralen Peak entsprechen der kohärenten Emission (Absorption) von Phononen, was die bidirektionale Mikrowellen-zu-Optik-Konversion demonstriert. Interessanterweise und im

Gegensatz zu herkömmlichen optomechanischen Systemen, bei denen Phononen direkt mit Photonen wechselwirken und die Stärke der Wechselwirkung nur von der Photonenzahl abhängt, skaliert die Wechselwirkung hier sowohl mit der Polaritonen- als auch mit der Phononenpopulation.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Arbeit von Kuznetsov et al. photonische, elektronische und Phononenresonanzen von strukturierten Halbleiter-Mikrokavitäten maßgeschneidert hat, um Phonoritonen sowie die kohärente bidirektionale Mikrowellen-zu-Optik-Konversion in einem Halbleitersystem zu demonstrieren.

Literatur

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Oscillation>
- [2] Keldysh & Ivanov, *Sov. Phys. JETP* **57**, 234 (1983)
- [3] Latini et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**, 227401 (2021)
- [4] Kuznetsov et al., *Phys. Rev. X* **11**, 021020 (2021)

Publikation

Title: Microcavity phonoritons – a coherent optical-to-microwave interface.

Authors: A. S. Kuznetsov,¹ K. Biermann,² A. A. Reynoso,^{2,3,4} A. Fainstein,^{2,3} and P. V. Santos¹

Zugehörigkeiten

¹Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin e.V., Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany

²Centro Atomico Bariloche and Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)- Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), 8400 Bariloche, Argentina

³Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (INN-Bariloche), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla, E-41012 Sevilla, Spain

Journal

Nature Communications

DOI: 10.1038/s41467-023-40894-7

Kontakte

- Alexander S. Kuznetsov, Dr., Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin e.V., Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany.
Email: kuznetsov@pdi-berlin.de
- Paulo V. Santos, Dr., Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin e.V., Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany.
Email: santos@pdi-berlin.de

Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik

Das Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) ist ein deutsches Forschungsinstitut, das Grundlagen- und angewandte Forschung an der Schnittstelle von Materialwissenschaft,

Festkörperphysik und Gerätetechnik betreibt. Das Institut ist Teil des Forschungsverbundes Berlin und Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft.

www.pdi-berlin.de