

■ Schwingen im Lichtfeld

Ein raffiniertes Experiment zeigt erstmals, wie optische Gradientenkräfte nanomechanische Oszillationen antreiben können – ein erster Schritt, um Nanophotonik und Nanomechanik zu vereinen.

Schon 1970 zeigte Arthur Ashkin an den Bell Laboratories, dass sich der Strahlungsdruck des Lichts nutzen lässt, um Teilchen einzufangen [1]. Mittlerweile dienen Laserstrahlen als optische Fallen für Atome und Moleküle oder als optische Pinzetten, mit denen sich z. B. biologische Zellen festhalten und manipulieren lassen. Bei der optischen Pinzette ist das Laserlicht scharf fokussiert, sodass die optische Intensität räumlich stark variiert und eine Gradientenkraft hervorruft, die Teilchen in den Fokus hineinzieht. Nun haben Mo Li und seine Kollegen von der Universität Yale den starken Intensitätsgradienten in nanophotonischen Wellenleitern auf einem Siliziumchip ausgenutzt, um einen nanomechanischen Oszillator zum Schwingen zu bringen – ein erster Schritt, um Nanophotonik und Nanomechanik zu vereinen [2].

In den letzten Jahren haben es nano- und mikromechanische Elemente mit winzigen Massen ermöglicht, den verschwindend kleinen Strahlungsdruck auf mechanische Oszillatoren zu beobachten. So ließ sich in optomechanischen Hohlraumresonatoren, in denen Photonen stark an die Bewegung eines Oszillators gekoppelt sind, dessen mechanische Bewegung mit Licht verstärken oder abschwächen („kühlen“) [3]. All diese Experi-

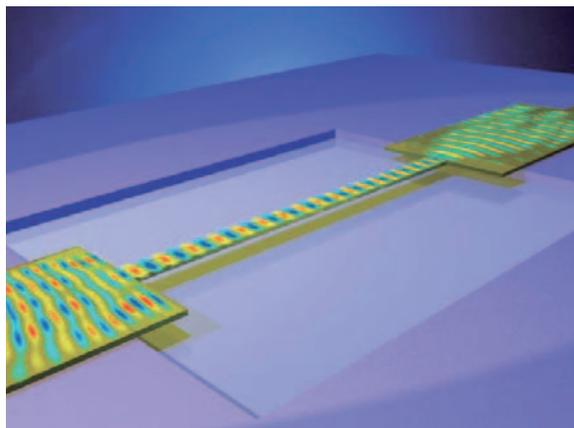


Abb. 1 Dieser Nanobalken, nur 300 Nanometer über einem Siliziumdioxid-Substrat angebracht, fungiert gleichzeitig als Wellenleiter und mechanisches Element.

mente konzentrierten sich bislang aber nur auf den Impulsübertrag bei der direkten Reflexion, also auf die Kraft, die parallel zur Lichtausbreitung wirkt, nicht jedoch auf Gradientenkräfte, die quer zur Ausbreitungsrichtung des Lichts wirken.

Hier kommen nun integrierte photonische Schaltkreise ins Spiel, in denen die Wellenleiter von der Größenordnung der eingesetzten Lichtwellenlänge sind. Diese grenzen das Lichtfeld stark ein und sorgen für eine ausgeprägte räumliche Variation der Intensität. Zwar gab es bereits Vorschläge, wie sich Gradientenkräfte in integrierter Photonik beobachten lassen könnten [4]. Aber erst Mo Li und seinen Kollegen ist dies nun mit einem raffinierten Aufbau gelungen, in dem ein Nanobauteil gleichzeitig als optischer Wellenleiter und mechanischer Resonator dient (Abb. 1). Die Integration des nanomechanischen Oszillators erreichen sie, indem sie Licht durch einen Wellenleiter schicken, von dem ein Teil freischwebend ist und damit mechanische Eigenschwingungen aufweist (Abb. 2). Damit erhält man einen „optomechanischen“ Wellenleiter, der das Licht eingrenzt und gleichzeitig als mechanisches Element dient, das in seiner fundamentalen Mode mit einer Frequenz von 10 MHz schwingt.

Um die Gradientenkräfte beobachten zu können, müssen die Wellenleiter so klein sein, dass ein

Teil des Lichtfeldes evaneszent ist, d. h. von der Grenzfläche des Wellenleiters an exponentiell abklingt. Die Yale-Forscher brachten den nanophotonischen Wellenleiter in der Nähe eines dielektrischen Substrats auf. Die Lücke dazwischen betrug gerade einmal 300 nm – das ist rund ein Fünftel der eingesetzten Lichtwellenlänge. Aufgrund des Feldgradienten, der mit dem Dielektrikum überlappt, wird der Wellenleiter nun in Richtung des Substrats gezogen (Abb. 2). Eine periodisch veränderliche Gradientenkraft lässt sich erzeugen, indem man den Lichtstrahl einem modulierten Antrieb aussetzt. Erreicht die Modulation die Resonanzfrequenz des nanomechanischen Resonators, treibt dies die Oszillation des Balkens an.

Einen mechanischen Balken in Oszillation zu versetzen, ist auch mit einer Vielzahl anderer Methoden zu erreichen, z. B. mittels eines magnetomotorischen Antriebs. Die optische Gradientenkraft zu verwenden, ist jedoch neu und verspricht eine sehr viel größere Bandbreite – möglicherweise bis in den Mikrowellenbereich hinein [5]. Zudem sind bei dieser Methode keine externen Felder wie beim magnetomotorischen Antrieb nötig.

Mo Li und seine Kollegen haben nachgewiesen, dass es hauptsächlich die Gradientenkraft ist, welche die Schwingung antreibt, denn thermische Effekte könnten die Oszillationen ebenfalls anregen und

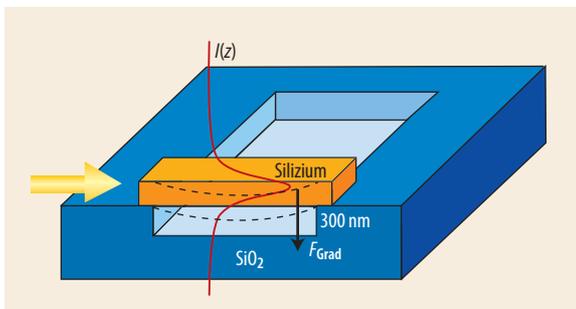


Abb. 2 Der nanophotonische Wellenleiter ist so auf einem Chip angebracht, dass er eine mechanische Resonanzfrequenz von 10 MHz besitzt. Die starke Gradientenkraft der optischen Mode überlappt mit dem Substrat und zieht den Wellenleiter zum Substrat. Durch Modulation des Laserstrahls bei der mechanischen Resonanzfrequenz lässt sich der Wellenleiter in Schwingung versetzen.

somit die Wirkung des Strahlungsdrucks auf den Balken vortäuschen [6]. Ein historisches Beispiel dafür ist Crookes' Lichtmühle, deren Schaufeln auf einer Seite Licht absorbieren und auf der anderen Licht reflektieren. Unter Bestrahlung beginnt die Mühle, sich zu drehen – jedoch in die Richtung, für die nicht der Strahlungsdruck verantwortlich sein kann, sondern die thermischen Effekte [7].

Die Messungen am Experiment im Hochvakuum zeigen, dass sich trotz der Nanometerabmessungen des Wellenleiterbalkens thermische Gradienten über eine Zeitskala aufbauen, die sehr viel langsamer ist als die mechanische Oszillationsperiode. Durch ausreichend schnelle Modulation des Lichts konnte im Experiment also sichergestellt werden, dass die antreibende Kraft hauptsächlich durch den Gradienten des optischen Feldes hervorgerufen wird – und nicht durch thermische Effekte. Bei Frequenzen im Gigahertzbereich ließen sich thermische Effekte schließlich ganz ausschließen.

Die Beobachtung von Gradientenkräften auf einem Chip ist sehr

vielversprechend für die Nanophotonik. Die aktuelle Arbeit zeigt, dass photonische Kräfte in optischen Leitern nanomechanische Oszillationen auslösen können. Das verwendete Prinzip eröffnet eine Fülle von Möglichkeiten, um nanomechanische und nanophotonische Elemente auf einem Chip einzusetzen, und bietet zudem große Flexibilität. Außerdem weist Silizium sehr gute mechanische Eigenschaften auf, sodass daraus die bisher empfindlichsten mechanischen Resonatoren gefertigt werden konnten [8]. All das verspricht vielfältige neue photonische Funktionsweisen, z. B. einen photonisch angetriebenen Mixer [9] oder schmalbandige Radiofrequenzfilter. So könnten die Gradientenkräfte ein neues Element in der Siliziumphotonik werden.

Die wahrscheinlich größte Herausforderung ist es, die Methode zu höheren Frequenzen zu verschieben. Denn dies erfordert eine größere optische Leistung, um die mechanischen Oszillationen anzutreiben. Schon jetzt ist die dafür erforderliche Leistung hoch und liegt im Bereich einiger zehn Milliwatt.

Dies lässt sich umgehen, wenn man den Abstand zwischen Wellenleiter und Substrat verringert. Alternativ kann man integrierte Ringresonatoren aus Silizium verwenden, also nanooptomechanische Hohlraumresonatoren, welche die erforderliche Leistung um einige Größenordnungen verringern und den Weg eröffnen, den mechanischen Oszillator ganz ohne zeitveränderliche Felder anzutreiben [3].^{*)}

Tobias J. Kippenberg

- [1] A. Ashkin, *PNAS* **94**, 4853 (1997)
- [2] M. Li et al., *Nature*, **456**, 480 (2008)
- [3] T. J. Kippenberg und K. J. Vahala, *Science* **321**, 1172 (2008)
- [4] M. L. Povinelli et al., *Optics Letters* **30**, 3042 (2005)
- [5] X. M. H. Huang, C. A. Zorman, M. Mehregany und M. L. Roukes, *Nature* **421**, 496 (2003); T. Carmon und K. J. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 123901 (2007)
- [6] C. H. Metzger und K. Karrai, *Nature* **432**, 1002 (2004); M. Zalalutdinov et al., *Appl. Phys. Lett.* **79**, 695 (2001);
- [7] A. E. Woodruff, *The Physics Teacher* **6**, 358 (1968)
- [8] D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mamin und B. W. Chui, *Nature* **430**, 329 (2004)
- [9] M. Hossein-Zadeh und K. J. Vahala, *Phot. Tech. Lett.* **19**, 1045 (2007)

*) Dieser Text ist eine bearbeitete und gekürzte Übersetzung von „Photonics: Nanomechanics gets the shakes“, *Nature* **456**, 458 (2008)

Dr. Tobias Kippenberg, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching und Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Schweiz)

■ Supraleitung auf Knopfdruck

Die Grenzfläche zwischen zwei isolierenden Oxiden lässt sich mit einem elektrischen Feld zwischen dem supraleitenden und dem isolierenden Zustand hin- und herschalten.

In den Achtzigerjahren beschäftigten sich zwei junge Post-Docs bei IBM Yorktown Heights, New York, bzw. an der Universität Genf unabhängig voneinander mit den erst seit wenigen Jahren bekannten Hochtemperatur-Supraleitern. Sie untersuchten die Kopplung zwischen zwei Supraleitern, die eine Nanometer-dünne isolierende Barriere voneinander trennt. Zwanzig Jahre später haben Jochen Mannhart und Jean-Marc Triscone, inzwischen Professoren in Augsburg bzw. Genf, ihre Kräfte vereint und die Dinge auf den Kopf gestellt. Anstelle dünner Barrieren zwischen Supraleitern untersuchten sie mit ihren Mitarbeitern Andrea Caviglia, Nicolas Reyren und Stefan Thiel nun

die Nanometer-dünnen supraleitenden Schichten, die spontan an der Grenzfläche zwischen zwei isolierenden Verbindungen entstehen [1]. Dabei ist es ihnen gelungen, diese Grenzfläche mit einem äußeren elektrischen Feld von dem supraleitenden in den isolierenden Zustand zu schalten [2]. Diese außergewöhnliche Leistung lässt weitere aufregende Ergebnisse erwarten.

Die Eigenschaften von Grenzschichten zwischen komplexen Oxiden wie die untersuchten Isolatoren SrTiO₃ und LaAlO₃ hängen entscheidend von der atomaren Anordnung ab. Dies lässt sich am besten erläutern, wenn man diese Materialien nicht auf traditionelle Weise aus Einheitszellen aufgebaut

betrachtet, sondern als Stapel von SrO- und TiO₂-Schichten bzw. von LaO- und AlO₂-Schichten. Beim Zusammenfügen dieser Materialien zu einer kristallinen Heterostruktur gibt es aufgrund ihrer Perowskit-Struktur zwei mögliche Grenzflächen: Entweder eine TiO₂-Schicht des SrTiO₃ trifft auf eine LaO-Schicht des LaAlO₃ (Abb. 1) oder das Paar SrO-AlO₂ entsteht. Um das Auftreten einer Variante zu erzwingen und somit eine wohl definierte Grenzfläche zu erhalten, ist es unerlässlich, die Herstellung der Oxid-Heterostrukturen auf atomarem Niveau zu kontrollieren. Dank verschiedener Fortschritte aus jüngerer Zeit ist es heute möglich, Schichtstapel aus Perowskit-Oxiden