

NANOPHYSIK

Pas de Deux in der Nanowelt

Benachbarte Nanosäulen können durch ein gemeinsames Substrat gekoppelt werden. Hierfür müssen die Säulen zu Biegeschwingungen angeregt werden. Die dabei entstehende Verspannung im Substrat vermittelt den Energieaustausch zwischen den Säulen und soll in Zukunft die Untersuchung deutlich komplexerer gekoppelter Systeme ermöglichen [1].

Nanostrukturierte Halbleitersäulen sind von hohem technologischen Interesse. Sie dienen als Nanodrähte [2], Wellenleiter [3] oder als Einzelphotonenquelle [4], während sich ihre mechanischen Biegemoden zur Messung kleinster Signale einsetzen lassen [5, 6].

In den vergangenen Jahren wurde gezeigt, dass es möglich ist, mehrere dieser Freiheitsgrade zu koppeln und so die Funktionalität einzelner Nanosäulen zu vergrößern. Nun wendet sich die Wissenschaft ganzen Netzwerken von Nanosäulen zu, um die kollektive Dynamik dieser funktionalen Nanostrukturen zu untersuchen. Dies erfordert eine Methode zur Kopplung zweier benachbarter Nanosäulen, um so Anregungen innerhalb des Netzwerks übertragen zu können.

Einen derartigen Mechanismus zur Kopplung benachbarter Nanosäulen hat unsere Gruppe von der Universität Konstanz vor kurzem vorgestellt [1]. Er beruht auf der mechanischen Verspannung, welche die Verbiegung einer Säule im Substrat hervorruft und sich so auf die benachbarten Säulen überträgt (Abbildung 1).

Um die verspannungsinduzierte Kopplung genau untersuchen zu können, haben wir Paare von Nanosäulen mittels Elektronenstrahlolithographie und reaktivem Ionenätzen aus dem Halbleitermaterial Galliumarsenid hergestellt. Im Anschluss daran wurden die nanomechanischen Schwingungseigenschaften von Säulenpaaren mit unterschiedlichen Längen, Durchmessern und

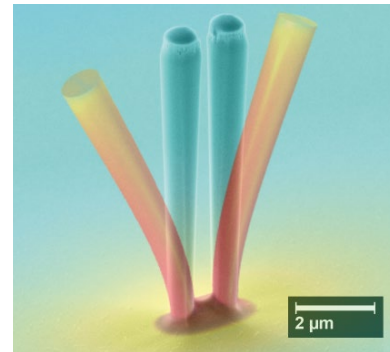


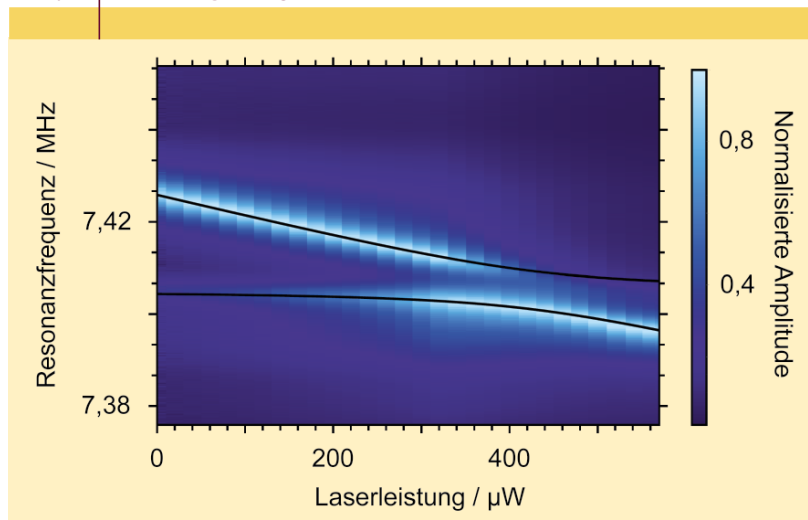
Abb. 1 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Nanosäulenpaares (blau), überlagert mit dem simulierten Verspannungsfeld der mechanischen Biegemode.

Abständen genau vermessen. Jede Nanosäule stellt einen nanomechanischen Resonator dar, der zwei senkrecht zueinander stehende, fundamentale Biegemoden aufweist, was auf insgesamt vier Biegemoden führt.

Zunächst wurden die Schwingungsmoden des Säulenpaares im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Hierfür wird das Säulenpaar mit Hilfe eines unter der Probe befestigten Piezoaktors in Schwingung versetzt und elektronenstrahlmikroskopisch abgebildet. Bei Eigenfrequenzen im Bereich einiger Megahertz schwingen die Säulen mehrere Millionen Mal pro Sekunde hin und her. Das langsam gerasterte Bild zeichnet somit die Einhüllende der Vibrationsmoden auf. Auf diese Weise fanden wir vier Moden. Allerdings schwingt jeweils nicht nur eine Säule, sondern beide. Es sind symmetrische oder antisymmetrische (Abbildung 1) Schwingungen beider Säulen möglich, die wiederum unter zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen auftreten können. Dies stellt einen klaren Hinweis auf eine starke mechanische Kopplung der Säulen über das Substrat dar.

In einem zweiten Experiment haben wir die Antwort des Säulenpaares auf den Piezoantrieb interferometrisch untersucht. Hierbei wurde die Eigenfrequenz einer der Säulen durch laserinduziertes Heizen durchgestimmt. Abbildung 2 zeigt die Fre-

ABB. 2 | ZWEI EIGENMODEN



Frequenzantwort zweier Eigenmoden des Säulenpaares. Mit steigender Laserleistung wird die rechte Säule (obere Kurve) erwärmt und so deren Eigenfrequenz verringert. Anstatt sich zu kreuzen, zeigen die beiden Zweige bei etwa 400 µW eine „Niveaubastörung“. Die Größe der entstehenden Aufspaltung entspricht dabei der Stärke der Kopplung zwischen den Säulen.

quenzantwort von zwei der vier Eigenmoden des Säulenpaares als Funktion der Laserleistung. Um nur eine der beiden Säulen zu heizen, ist der Laser genau über der rechten Säule zentriert, der die etwas höherfrequente Schwingungsmode zugeordnet ist. Daher erzeugt die Schwingung dieser Säule (obere Kurve in Abbildung 2) ein wesentlich stärkeres Signal als die linke Säule, die aufgrund von minimalen fabrikationsbedingten Abweichungen bei einer etwas niedrigeren Frequenz schwingt. Wird nun die Laserleistung erhöht und damit die Frequenz der rechten Säule erniedrigt, nähern sich die beiden Moden zunächst einander an, laufen dann jedoch aneinander vorbei, anstatt sich zu kreuzen, wie es bei ungekoppelten Moden der Fall wäre.

Diese „Niveauabstoßung“ ist charakteristisch für die Ausprägung der gekoppelten Moden. Da nun immer beide Säulen schwingen, entweder symmetrisch oder antisymmetrisch, sind auch beide Modenzweige gleich stark zu erkennen.

Ein Vergleich von Messungen verschiedener Nanosäulenpaare mit Simulationen zeigt eine klare Geometrieabhängigkeit. Die Kopplungsstärke steigt mit sich verringerndem Abstand der Säulen sowie mit wachsendem Säulenradius.

Mit dieser Grundlage können nun Felder aus vielen hundert Nanosäulen hergestellt werden. So kann in Zukunft die kollektive Dynamik einer großen Zahl von gekoppelten nanomechanischen Resonatoren erforscht werden. Dies eröffnet die

Möglichkeit zu wegweisenden Untersuchungen von nanomechanischen Bandstrukturen, akustischen Metamaterialien mit topologischen Randzuständen oder der Realisierung von synchronisierten Einzelphotonenquellen.

Literatur

- [1] J. Doster et al., *Nature Comm.* **2019**, *10*, 5246.
- [2] D. K. Ferry, *Science* **2008**, *319*, 5863.
- [3] R. Yan et al., *Nature Photon.* **2009**, *3*, 569.
- [4] I. Yeo et al., *Nature Nanotech.* **2013**, *9*, 106.
- [5] L. Mercier de Lepinay et al., *Nature Nanotech.* **2017**, *12*, 156.
- [6] N. Rossi et al., *Nature Nanotech.* **2017**, *12*, 150.

*Juliane Doster, Eva Weig,
Uni Konstanz*

ASTRONOMIE

Zwei Sonnenzyklen gleichzeitig

Ende April beobachteten Astronomen ein interessantes Phänomen: Auf der Südhalbkugel der Sonne gab es zwei Flecken mit unterschiedlicher magnetischer Polarität: Sie stammen aus verschiedenen Sonnenzyklen. Der linke Sonnenfleck besitzt die Polarität minus-plus und gehört zum alten Zyklus 24, der

rechte plus-minus zum neuen Zyklus 25.

Der amerikanische Astronom George Ellery Hale stieß bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf ein fundamentales Gesetz: Sonnenflecken treten meistens in Zweiergruppen auf, und ihre Fußpunkte bilden magnetische Dipole in Ost-West-

Ausrichtung. Die Polarität gehorcht einer Spiegelsymmetrie: Sie wechselt in jeder Hemisphäre die Orientierung von einem Sonnenfleckenzyklus zum nächsten. So war sie im Zyklus 24 auf der Südhalbkugel minus-plus und sollte im kommenden Zyklus plus-minus sein.

Die Sonnenzyklen überlappen sich bei ihren Übergängen, und manchmal tauchen Flecken aus beiden Zyklen auf, wie im April. Sonnenzyklus 25 erwacht offenbar zum Leben.

TB

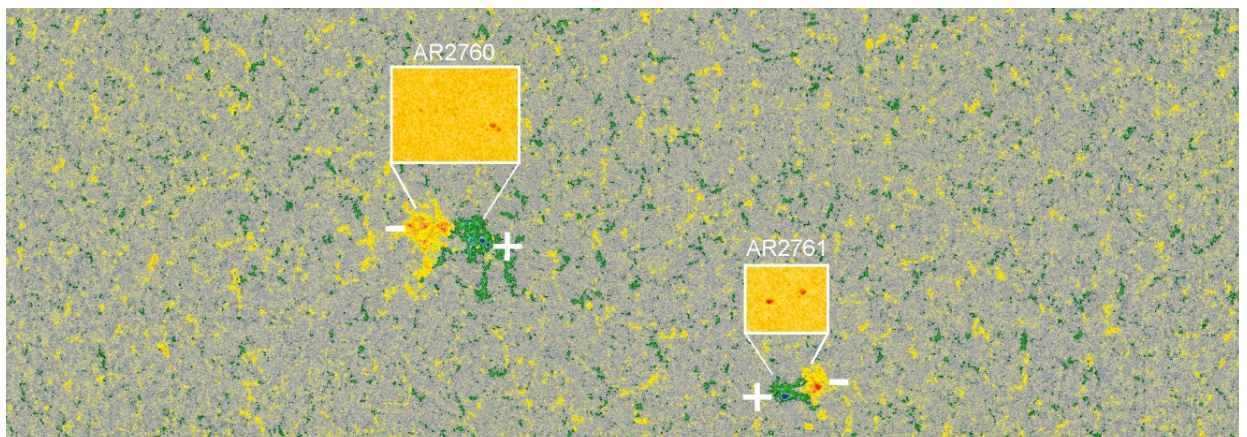


Abb. 1 Magnetfelder in zwei Sonnenflecken auf der Südhalbkugel, aufgenommen mit dem Solar Dynamics Observatory der NASA.