

Pressemitteilung

Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie
Alexandra Wettstein

12.10.2021

<http://idw-online.de/de/news777374>

Forschungsergebnisse, Wissenschaftliche Publikationen
Physik / Astronomie
überregional



Max Born Institute

und Berlin e.

Ultraschnell und gekoppelt – atomare Schwingungen im Quantenmaterial Bornitrid

Aus wenigen Atomschichten bestehende Materialien zeigen Eigenschaften, die durch die Quantenphysik bestimmt sind. In solchen Schichtpaketen lassen sich mit infrarotem Licht Schwingungen der Atome auslösen.

Für das Quantenmaterial Bornitrid wurde jetzt erstmals nachgewiesen, dass ultraschnelle atomare Schwingungen innerhalb der Schichten, sog. transversal optische Phononen, direkt an Bewegungen der Schichten gegeneinander koppeln. Für ein Zeitintervall von ca. 20 Pikosekunden bewirkt diese Kopplung eine Frequenzverschiebung der optischen Phononen und der zugehörigen optischen Resonanz. Dieses Verhalten ist eine genuine Eigenschaft des Quantenmaterials und von Interesse für Anwendungen in der Optoelektronik bei höchsten Frequenzen.

Hexagonales Bornitrid besteht aus Schichten, in denen Sechsringe aus gebundenen Bor- und Stickstoffatomen regelmäßig angeordnet sind (Abb. 1). Zwischen benachbarten Schichten besteht eine wesentlich schwächere Kopplung über die sog. Van der Waals- Wechselwirkung. Schwingungen der Bor- und Stickstoffatome in einer Ebene, sog. transversal optische (TO) Phononen, besitzen mit ca. 40 Terahertz (THz, 4×10^{13} Schwingungen pro Sekunde) eine 10 bis 100fach höhere Frequenz als Bewegungen der Ebenen gegeneinander, die sog. Scher- und Atmungsschwingungen. Über ein Zusammenspiel dieser unterschiedlichen Bewegungen und ihre Lebensdauer nach optischer Anregung war bisher nahezu nichts bekannt.

Im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit haben ForscherInnen aus Berlin, Montpellier, Nantes, Paris und Ithaca (USA) detaillierte experimentelle und theoretische Ergebnisse zur Dynamik gekoppelter Phononen vorgelegt. Wie sie in einer jetzt erschienenen Veröffentlichung berichten (Physical Review B 104, L140302 (2021)), besitzen TO-Phononen in einem Stapel von 8 bis 9 Bornitridschichten eine Lebensdauer von 1.2 ps (1 ps = 10^{-12} s), während Scher- und Atmungsschwingungen für ca. 40 ps angeregt bleiben (Abb. 2b). Diese Lebensdauern wurden in Anrege-Abtastexperimenten mit Femtosekundenimpulsen direkt gemessen. Sie stimmen sehr gut mit theoretischen Berechnungen überein, die auf einer Analyse der Phonon-Zerfallskanäle beruhen.

Die Anregung von Scher- und Atmungsschwingungen, die an TO-Phononen koppeln, führt zu einer charakteristischen spektralen Verschiebung der TO-Phonon-Resonanz in den optischen Spektren (Abb. 2a). Die theoretische Analyse liefert die Kopplungsenergie zwischen den Schwingungen und zeigt, dass die entsprechende Kopplung in einem Bornitrid-Volumenkristall aus einer sehr hohen Zahl atomarer Schichten vernachlässigbar klein ist. Das beobachtete gekoppelte Schwingungsverhalten ist damit eine spezifische Eigenschaft des Quantenmaterials.

Die nach Anregung der Phononen beobachtete Verschiebung ihres Reflexionsspektrums stellt ein nichtlinear-optisches Verhalten dar, das sich mit moderaten optischen Leistungen hervorrufen lässt. Es ist von Interesse für optoelektronische Anwendungen im Giga- bis Terahertz-Frequenzbereich, etwa für optische Schalter und Modulatoren.

Bildunterschrift: Abbildung 1:

Schwingungen eines Pakets hexagonaler Bornitrid-Schichten. Die Animationen zeigen Scher- und Atmungsschwingungen niedriger Frequenz, das TO-Phonon und gekoppelte Atmungs-/TO-Phonon Bewegungen.

Bildunterschrift: Abbildung 2:

(a) Stationäres Reflexionsspektrum (dicke schwarze Linie) eines Bornitrid-Schichtpakets (8 bis 9 Schichten) im Bereich der TO-Phonon Linie. Die Stärke der Reflexion ist als Funktion der optischen Frequenz in THz gezeigt. Die Symbole zeigen die Änderung der Reflexion $DR=(R-R_0)/R_0$, die zu verschiedenen Verzögerungszeiten nach der Anregung der Probe gemessen wurde (R_0 , R : Reflexion vor und nach Anregung). Die bei längeren Verzögerungszeiten beobachtete Reflexionszunahme bei kleinen Frequenzen und Reflexionsabnahme bei großen Frequenzen entspricht einer Rotverschiebung der TO-Phonon Linie.

(b) Zeitabhängige Reflexionsänderung bei 40.7 THz (roter Pfeil in Teilbild (a)) und bei 41 THz (blauer Pfeil in (a)) als Funktion der Verzögerungszeit zwischen Anregungs- und Abtastimpuls (in Pikosekunden). Die Transienten zeigen einen schnellen Zerfall mit einer Zeitkonstante von 1.2 ps, der TO-Phonon-Lebensdauer, und einen langsamen Zerfall mit 22 ps, der Lebensdauer von Scher- und Atmungsschwingungen.

wissenschaftliche Ansprechpartner:

Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy

Dr. Taehee Kang - +49 30 6392 1476 - taehee.kang@mbi-berlin.de

Prof. Dr. Thomas Elsaesser - +49 30 6392 1400 - thomas.elsaesser@mbi-berlin.de

Prof. Dr. Klaus Reimann - +49 30 6392 1476 - klaus.reimann@mbi-berlin.de

Dr. Michael Woerner - +49 30 6392 1470 - michael.woerner@mbi-berlin.de

Originalpublikation:

Ultrafast nonlinear phonon response of few-layer hexagonal boron nitride

Taehee Kang, Jia Zhang, Achintya Kundu, Klaus Reimann, Michael Woerner, Thomas Elsaesser, Bernard Gil, Guillaume Cassabois, Christos Flytzanis, Giorgia Fugallo, Michele Lazzeri, Ryan Page, and Debdeep Jena
Phys. Rev. B 104, L140302 – Published 11 October 2021

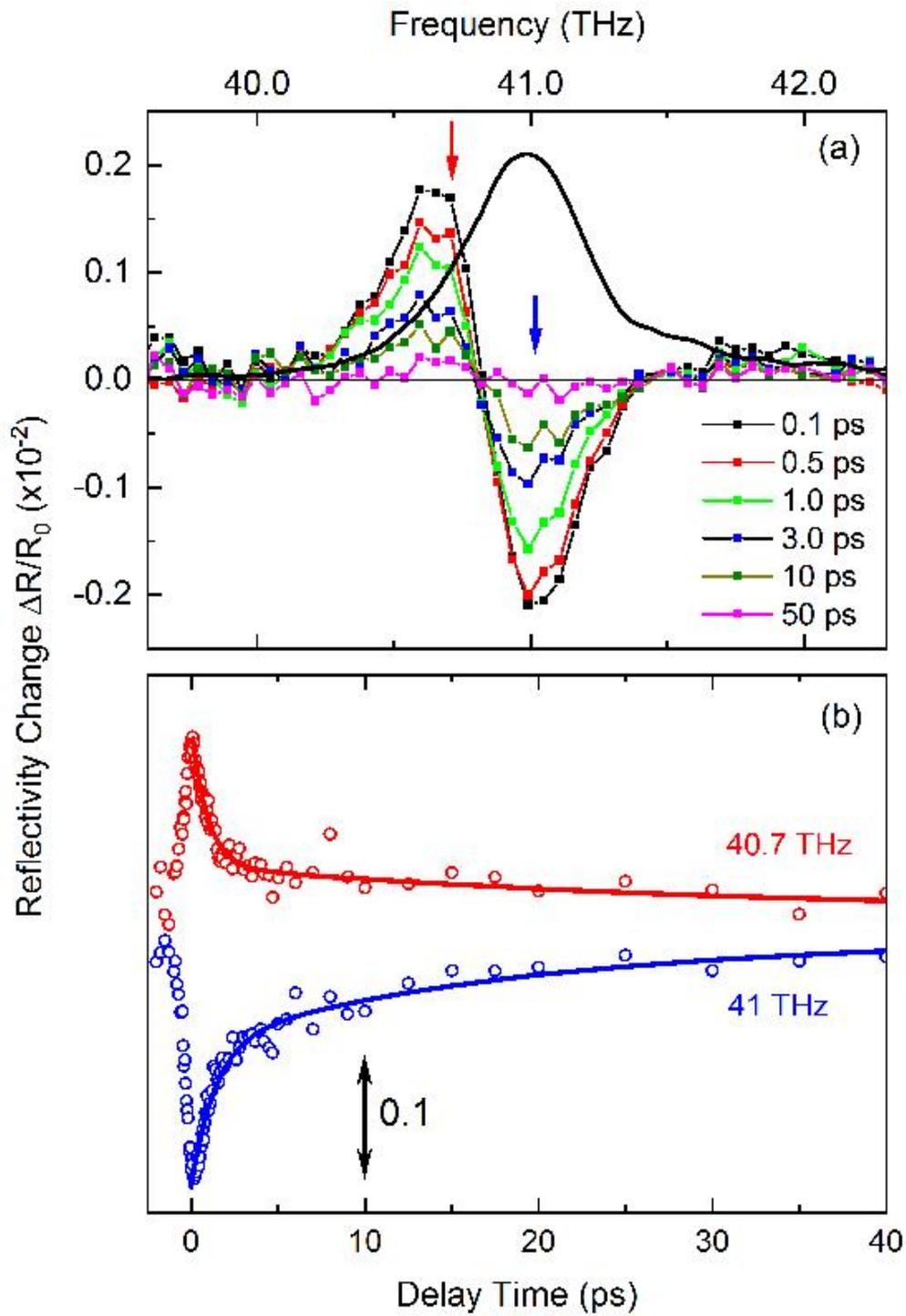
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.104.L140302>

<https://mbi-berlin.de/de/forschung/highlights/details/ultrafast-and-coupled-atomic-vibrations-in-the-quantum-material-boron-nitride>

URL zur Pressemitteilung: <http://Die animierten Gifs sind auf unserer Webseite zu finden:>

URL zur Pressemitteilung: <https://mbi-berlin.de/de/forschung/highlights/details/ultrafast-and-coupled-atomic-vibrations-in-the-quantum-material-boron-nitride>

Anhang Teaser zur Pressemitteilung <http://idw-online.de/de/attachment87669>



Stationäres Reflexionsspektrum
Dr. Taehee Kang
Dr. Taehee Kang/MBI

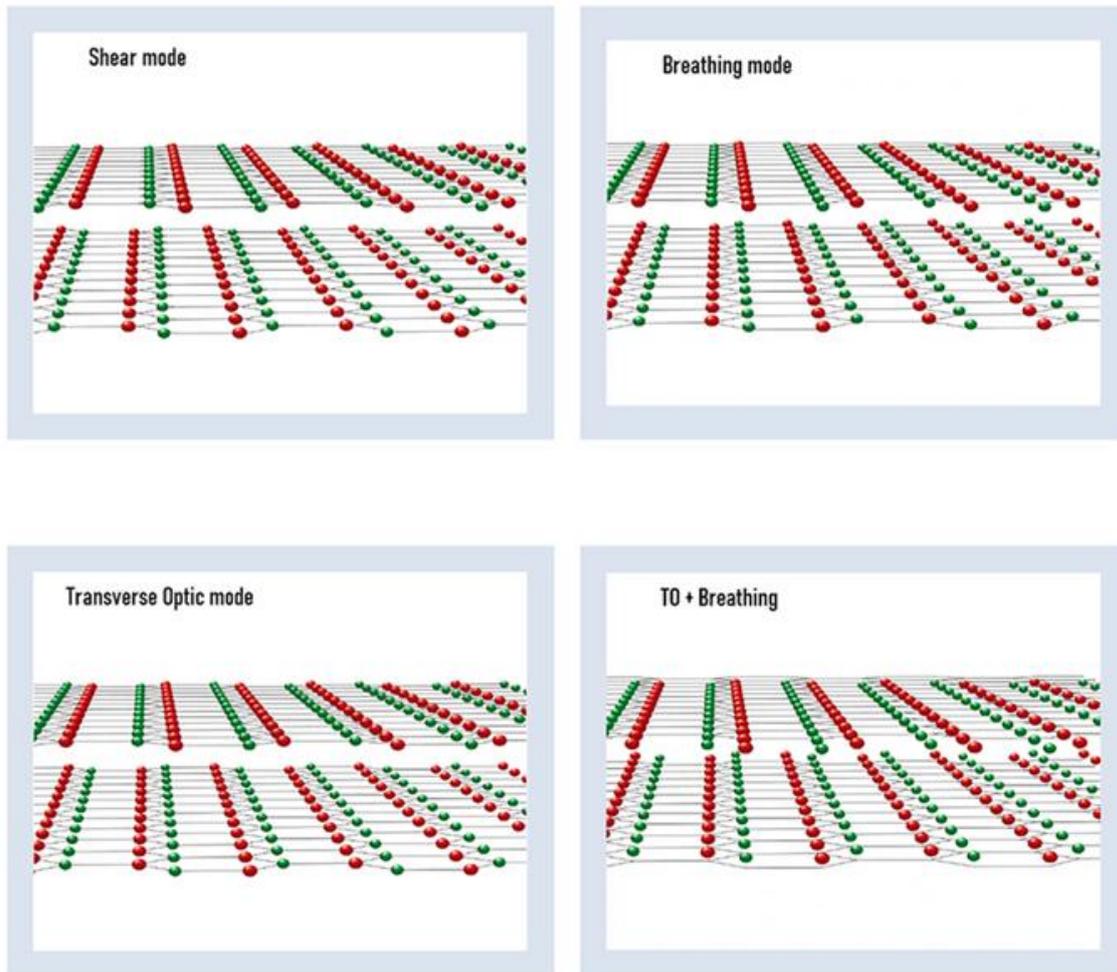


Abb 1. Schwingungen eines Pakets hexagonaler Bornitrid-Schichten. Die Animationen zeigen Scher- und Atmungsschwingungen niedriger Frequenz, das TO-Phonon und gekoppelte Atmungs-/TO-Phonon Bewegungen.
Dr. Taehee Kang
Dr. Taehee Kang/MBI