

Sofort harmonisch

Mit intensiven Terahertz-Feldern lassen sich in Festkörpern fast instantan hohe Harmonische erzeugen.

Die optische Spektroskopie dient schon seit über einem Jahrhundert dazu, Informationen über elektronische Materiezustände zu gewinnen. So hat die präzise Vermessung der Übergangsennergien von Atomen entscheidende Impulse für die Quantenmechanik geliefert. Die Entwicklung intensiver Laser vor rund fünfzig Jahren ermöglichte Experimente der nichtlinearen Optik. In diesem Regime hängen die Eigenschaften der Materie nicht mehr linear von der Amplitude des elektromagnetischen Feldes ab, und es lassen sich beispielsweise höhere Harmonische der eingestrahlten Frequenz erzeugen. In atomaren Systemen wird dieser Prozess schon seit einiger Zeit erfolgreich erforscht [1]. Die aufgrund der nichtlinearen Dynamik von Elektronen in extrem intensiven elektromagnetischen Feldern abgestrahlte Strahlung lässt sich etwa nutzen, um ultrakurze Attosekundenpulse (10^{-18} s) zu erzeugen. Dieses Forschungsfeld, in dem rasch oszillierende optische Lichtfelder Elektronen bewegen und steuern, heißt auch Lichtwellen-Elektronik.

Kürzlich haben Physiker der Universitäten Regensburg und Marburg die Bewegung von Elektronen, die durch extrem intensive Terahertz-Felder getrieben werden, in einem Galliumselenid-Halbleiterkristall auf einer Femtosekunden-Skala beobachtet und detailliert analysiert [2]. Diese Versuche zeigen, dass die hohen Harmonischen quasi-instantan und fast ausschließlich durch die positive Halbwelle des anregenden Terahertz-Pulses erzeugt werden (Abb. 1). Das ist bemerkenswert, weil es klar zeigt, dass die Emission von hohen Harmonischen in Festkörpern andere Ursachen haben muss als in atomaren Systemen. Für ein Atom als kleines lokalisiertes Objekt mit diskreten gebundenen elektronischen Energieniveaus lässt sich die Erzeugung hoher Harmonischer mit einem Dreistufenmodell beschreiben,

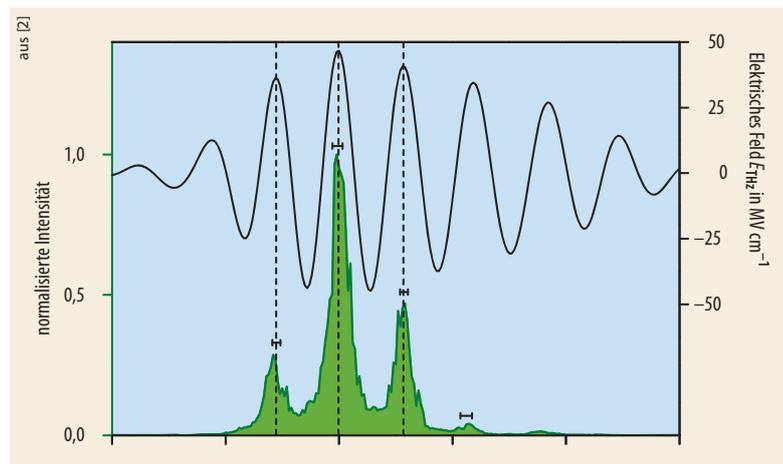


Abb. 1 Ein Terahertz-Feld mit einer Amplitude von 47 MV/cm und einer Zentralfrequenz von 33 THz (schwarze Linie) regt die Elektronen in Galliumselenid an. Die resultierende Emission (grüne Kurve) wird über Summenfrequenzmessung mit einem weiteren Puls und Integration über ein Frequenzfenster von 490 bis 523 THz gemessen. Die gestrichelten senkrechten Linien entsprechen den Maxima des anregenden Terahertz-

Feldes, und die Fehlerbalken geben die Ungenauigkeit der Messung des zeitlichen Maximums der Emission an. Man erkennt deutlich, dass die Erzeugung hoher Harmonischer für positive Feldamplituden deutlich stärker ausfällt als für negative und dass keine messbare Verzögerung zwischen dem Maximum des anregenden Feldes und der Emission detektiert wurde.

d. h. feldinduzierte Ionisation eines Elektrons, Beschleunigung und Rekollision [1]. Dieser Vorgang ist immer mit einer gewissen Zeitverzögerung verbunden. Festkörper stellen dagegen eine periodische Anordnung von Atomen dar. Diese Periodizität führt dazu, dass die erlaubten elektronischen Energien kontinuierliche Bereiche (Bänder) haben und die Wellenfunktionen über den gesamten Kristall ausgedehnt sind. Das macht die Dynamik von Festkörperelektronen in starken elektromagnetischen Feldern recht komplex. Hierbei treten Effekte auf, die in atomaren Systemen nicht existieren [3], wie die nahezu instantane Emission in Galliumselenid. Sie lässt sich nicht durch das Dreistufenmodell beschreiben, sondern durch einen neuartigen quantenmechanischen Interferenzeffekt erklären: Da unmittelbar nach der Anregung die Energie der Elektronen zunächst nicht eindeutig bestimmt ist, befinden sich die Elektronen in einem Superpositionszustand, zu dem mehrere Bänder beitragen. Je nach Richtung des Terahertz-Feldes ist

die elektronische Interferenz konstruktiv oder destruktiv. Daraus resultiert eine starke bzw. schwache Emission. Die Messungen und ihre quantentheoretische Analyse geben dabei erstmalig Aufschluss über die genaue zeitliche Struktur und die fundamentalen Prozesse, die der Erzeugung hoher Harmonischer in Festkörpern zugrunde liegen.

Drei Effekte sind wesentlich, um die Beobachtungen [2] zu erklären. Erstens das so genannte Interbandtunneln: Ist der Halbleiter undotiert und im Grundzustand, bewirkt ein schwaches elektrisches Feld keinen Stromfluss, da in vollständig gefüllten Bändern keine Elektronen beschleunigt werden können. Wenn das elektrische Feld aber stark genug ist, können Elektronen die Energiebarrieren zwischen den Bändern durchtunneln, und es fließt ein elektrischer Strom [4]. Bei den in [2] verwendeten extrem hohen Feldamplituden von bis zu fast 50 MV/cm tunneln die Elektronen innerhalb von Femtosekunden in andere Bänder. Solche hohen Feldamplituden sind erst seit Kurzem im Labormaßstab möglich.

Prof. Dr. Torsten Meier, Department Physik, Universität Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

Zweitens spielt die Beschleunigung durch das Feld eine weitere entscheidende Rolle: In einem nicht vollständig gefüllten Band beschleunigt ein elektrisches Feld die Elektronen so, dass sich ihr Quasi-Impuls proportional zur Feldamplitude zeitlich ändert. Erreicht der elektronische Quasi-Impuls den Rand der 1. Brillouin-Zone, so wird das Elektron Bragg-reflektiert und führt seine Bewegung am gegenüberliegenden Rand der ersten Brillouin-Zone fort. Erreicht das Elektron nach vollständigem Durchqueren der ersten Brillouin-Zone seinen ursprünglichen Quasi-Impuls, so spricht man von einer Bloch-Oszillation. Für ein statisches Feld bedeutet dies, dass ein Elektron, das nicht in ein anderes Band tunnelt, eine periodische Bewegung im Impulsraum und eine oszillatorische Bewegung im Ortsraum ausführt [5]. Bei den in [2] verwendeten extrem starken Terahertz-Feldern führen die Elektronen „dynamische“ (weil durch ein Wechselfeld erzeugte) Bloch-Oszillationen [6] aus. Die schnelle räumliche Bewegung der Elektronen führt dann zur Abstrahlung hoher Harmonischer.

Würde man nur das Interbandtunneln und die Beschleunigung durch das Feld berücksichtigen, könnte ein Festkörper nur ungerade Vielfache der Anregungsfrequenz abstrahlen, und die Emission würde nicht von der Polarität des elektrischen Feldes abhängen. Die aktuellen experimentellen Ergebnisse lassen sich aber erklären, wenn drittens eine fehlende Inversions-symmetrie vorliegt: Wie die Autoren von [2] gezeigt haben, entstehen die hohen Harmonischen dominant nur für eine Polarität des elektrischen Feldes. Dafür ist eine Symmetriebrechung notwendig. Daher ist dieser Effekt nur in Materialien wie Galliumselenid möglich, die nicht-inversionssymmetrisch sind. Nur dann können optische Matrixelemente zwischen allen relevanten Bändern existieren, wodurch die Elektroneninterferenz [2] und auch die signifikante Erzeugung gerader Harmonischer [6] möglich sind.

Aufwändige Simulationen waren notwendig, um die experimentellen Resultate sinnvoll interpretieren zu können. Sie haben gezeigt, dass sich die experimentellen Resultate unter Berücksichtigung von fünf Bändern hinreichend präzise beschreiben

lassen. Das belegt, wie man auch in diesem extremen Regime der Licht-Materie-Wechselwirkung mit einer auf dem Bändermodell basierenden dynamischen Quantentheorie die relevanten Prozesse erhalten kann.

Die faszinierenden Erkenntnisse der Forscher aus Regensburg und Marburg sind richtungsweisend, um Konzepte für eine neuartige Lichtwellen-Elektronik auf Basis von Festkörpern zu entwickeln, bei der sich elektrische Ströme schnellstmöglich durch elektromagnetische Wechselfelder, also Licht, erzeugen und steuern lassen. Das könnte vielfältige Möglichkeiten eröffnen, um Festkörper als kompakte und ultraschnelle Bauelemente zu nutzen.

Torsten Meier

- [1] P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. **71**, 1994 (1993); T. Brabec und F. Krausz, Rev. Mod. Phys. **72**, 545 (2000)
- [2] M. Hohenleutner et al., Nature **523**, 572 (2015)
- [3] M. Wegener, Extreme Nonlinear Optics – An Introduction, Springer (2005)
- [4] C. Zener, Proc. R. Soc. A **137**, 696 (1932)
- [5] F. Bloch, Z. Phys. **52**, 555 (1929); J. Feldmann et al., Phys. Rev. B **46**, 7252 (1992); C. Waschke et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 3319 (1993)
- [6] O. Schubert et al., Nature Photonics **8**, 119 (2014)

VERMESSENE MISSION

Die Gaia-Mission soll ein Prozent der rund 100 Milliarden Sterne der Milchstraße vermessen und ein dreidimensionales Modell unserer Heimatgalaxie liefern (<http://sci.esa.int/gaia>). Gaia durchmustert dafür den Himmel von seinem Orbit um den Lagrange-Punkt L2 aus und misst immer wieder Positionen, Entfernungen, Eigenbewegungen, Helligkeit, Farben und Temperaturen der Sterne. Zu mehr als 100 Millionen Sternen soll die Sonde auch die Radialgeschwindigkeiten bestimmen. Ende August hat Gaia das erste Jahr der Routinephase erfolgreich absolviert. Ergebnis davon sind bereits

272 Milliarden astrometrische und 54,4 Milliarden photometrische Messungen sowie 5,4 Milliarden Spektren. Aus den Daten ließ sich auch ein eindrucksvolles Milchstraßen-Panorama gewinnen (Abb.), in dem die Sternendichteverteilung und die lichtschluckenden interstellaren Gas- und Staubböden zu erkennen sind. Unterhalb der galaktischen Ebene sieht man die beiden benachbarten Zwerggalaxien, die Große und die Kleine Magellanschen Wolken. Gaia soll noch bis 2018 weiter messen. Mit den endgültigen Ergebnissen ist allerdings erst 2021 zu rechnen. (AP)

