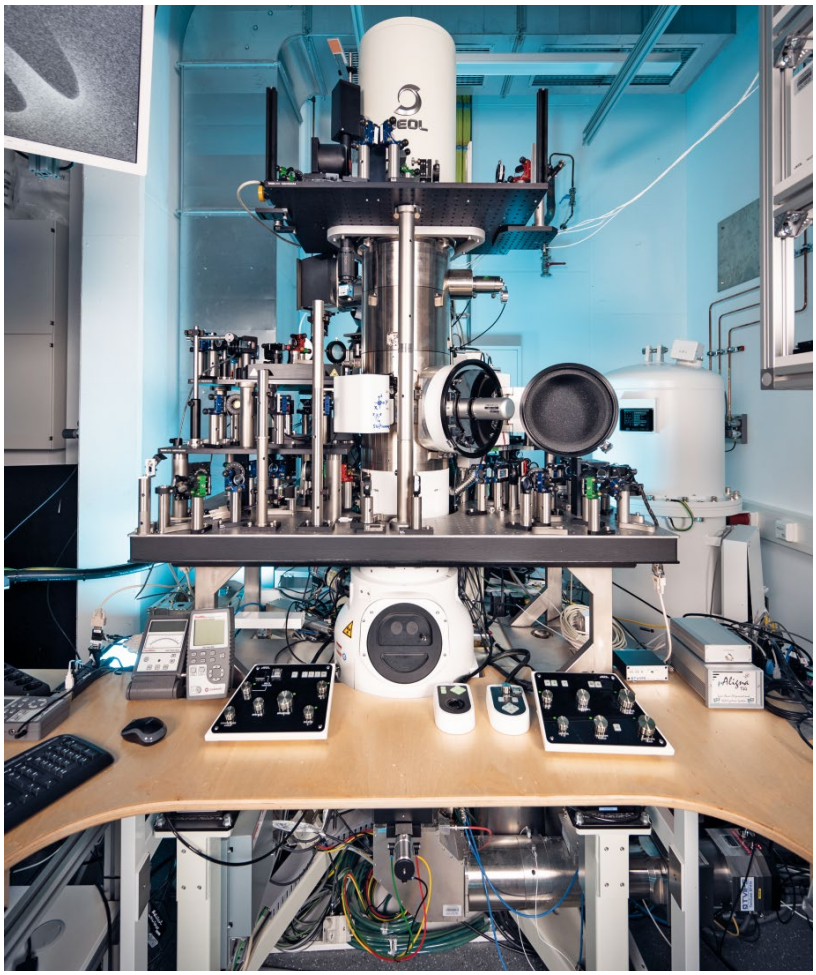
Check for updates

DOI: 10.1002/piuz.202401710

Attosekunden-Elektronenmikroskopie

Filme von Licht im Elektronenmikroskop

David Nabben | Joel Kuttruff | Peter Baum



Der grundlegende Vorgang bei der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie ist die Bewegung der Elektronen im Material in den extrem schnellen optischen Oszillationen der auftreffenden Lichtwelle. Die ultraschnelle Dynamik auf atomaren Dimensionen bestimmt also die makroskopische Funktionsweise. Kürzlich ist es uns gelungen, ein Elektronenmikroskop so mit einem Laser zu koppeln, dass Attosekunden-Zeitauflösung erreicht wird, schneller als die Oszillationen von Licht. Diese Idee ermöglicht nun das direkte Filmen von Licht und seiner Wechselwirkung mit komplexen Materialien als Funktion von Raum und Zeit.

Das Attosekunden-Elektronenmikroskop in Konstanz, Abbildung 2 erläutert den grundlegenden Aufbau *(Foto: G. Kiliani, Universität Konstanz).*

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Die Bindungen zwischen Atomen zu Molekülen, Festkörpern oder Nanostrukturen bestimmen die Materialeigenschaften unserer täglichen Umgebung. Wenn Reaktionen stattfinden, also Materie mit anderer Materie oder Licht wechselwirkt, müssen sich die Atome und Elektronen im Inneren von anfänglichen zu finalen Konfigurationen verschieben. Zum Beispiel basieren Phasenübergänge, chemische Reaktionen oder optische Bauelemente allesamt auf den Bewegungen und Neuordnungen der Atome und Elektronen im Inneren der beteiligten Substanzen.

Ein möglichst vollständiges Wissen über die so ablaufenden Prozesse auf atomaren Größenskalen ist nicht nur für ein fundamentales physikalisches Verständnis, sondern auch für die kontrollierte Nutzung und Weiterentwicklung spannender Materialien und Bauteile von entscheidender Bedeutung. Allerdings ist eine direkte räumliche und zeitliche Beobachtung dieser Abläufe – also das Verfolgen der Elektronenbewegungen in einzelnen Atomen oder Molekülen, das Filmen der Atome in Molekülen oder die Visualisierung der Elektronenoszillationen während optischer Phänomene – ein bisher unerreichter Meilenstein der modernen Physik.

Die Schwierigkeit liegt primär in den extrem kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen, auf denen all diese ele-

Online-Ausgabe unter: wileyonlinelibrary com

© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)
URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-2-ardqt2v0gw5b1

mentaren Prozesse stattfinden. Ein Atom hat ungefähr die Größe von 10^{-10} m, zehntausendmal kleiner als eine Wellenlänge von Licht. Die Zeitskalen, auf denen atomare und elektronische Prozesse ablaufen, sind Femto- und Attosekunden, also 10^{-15} und 10^{-18} s. Ein experimenteller Zugang zu diesen unvorstellbar kurzen Zeitskalen stellt eine enorme Herausforderung dar, wenn gleichzeitig eine räumliche Aufösung der Atome erreicht werden soll. Abbildung 1 ordnet einige fundamentale physikalische Prozesse in ihre räumlichen und zeitlichen Skalen ein und zeigt die Grenzen der derzeitigen experimentellen Messmethoden.

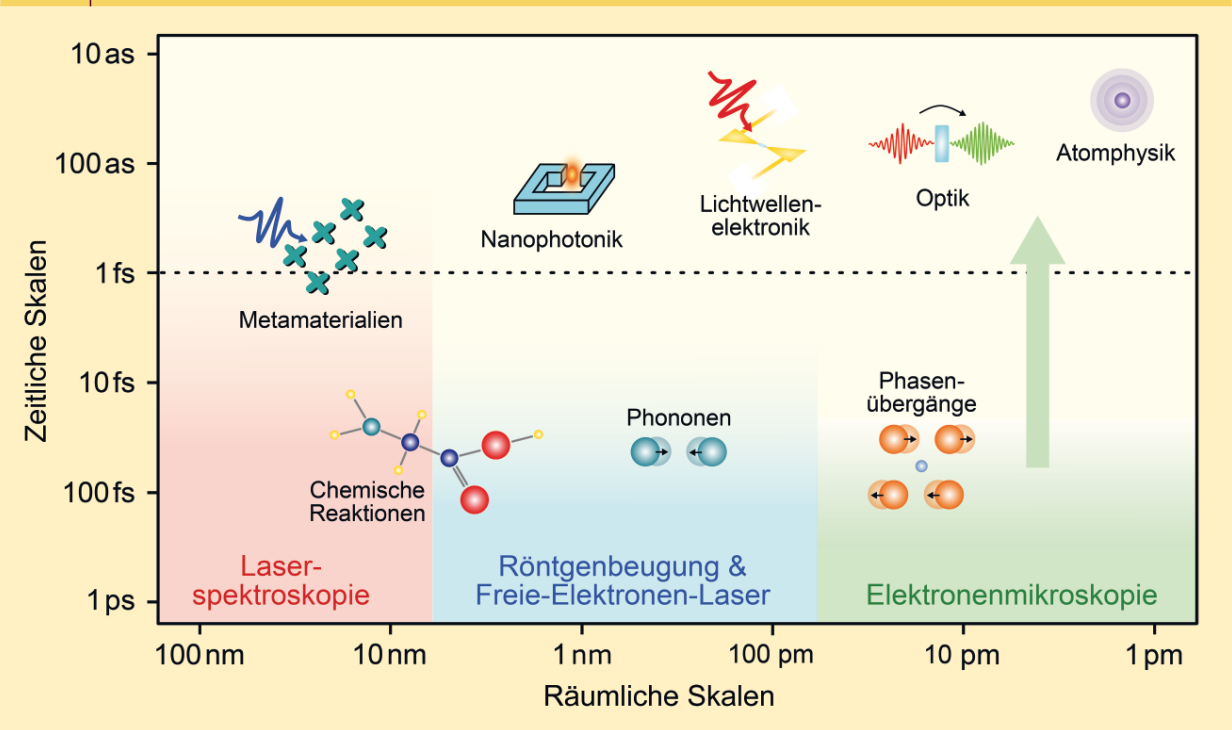
Kürzlich ist es unserer Gruppe an der Universität Konstanz gelungen, hier einen neuartigen Zugang zu finden. Wir haben dazu ein Transmissions-Elektronenmikroskop, das atomare räumliche Auflösung ermöglicht, mit den ultrakurzen optischen Zyklen eines Dauerstrichlasers kombiniert. Das ermöglicht Filme von Licht-Materie-Wechselwirkungen an nanophotonischen Objekten mit Attosekunden- und Nanometer-Auflösung [1]. Diese neue Technologie wird dazu beitragen, künftig atomare und elektronische Bewegungen in fast allen wissenschaftlich oder technologisch relevanten Materialien direkt in Raum und Zeit zu beobachten und die so entstehenden Erkenntnisse für Weiterentwicklungen zu nutzen.

Attosekunden-Elektronenmikroskopie

Abbildung 2 und das Foto auf Seite 12 zeigen unser Attosekunden-Elektronenmikroskop. Es basiert auf einem stroboskopischen Messprinzip, das etablierten Anrege-Abfrage-Experimenten ähnelt. Es verwendet aber zur Anregung der Probe keine ultrakurzen Laserpulse, sondern die optischen Oszillationsperioden von kontinuierlichem Laserlicht. Die Idee hierbei ist, dass man den zu untersuchenden Prozess repetitiv antreibt und dann die Antwort des Systems zu verschiedenen, durchstimmbaren Verzögerungszeiten innerhalb einer einzelnen optischen Feldoszillation mit extrem kurzen Elektronenpulsen abfragt. Das bringt allerdings die Herausforderung mit sich, dass diese Abfragepulse im Elektronenmikroskop kürzer als das aufzulösende Signal und phasenstabil zur Anregung sein müssen, damit die notwendige Attosekunden-Zeitauflösung erreicht werden kann.

Um eine solche Sequenz von Attosekunden-Elektronenpulsen zu erzeugen, lassen wir den kontinuierlichen Elektronenstrahl des Transmissions-Elektronenmikroskops mit den elektromagnetischen Feldern eines Dauerstrichlasers interagieren. Die extrem schnellen Schwingungen des Dauerstrichlasers modulieren dann periodisch die Energie und somit die Geschwindigkeit der Elektronen (siehe „Elektronenpulse mit dielektrischen Membranen“ auf Seite 16).

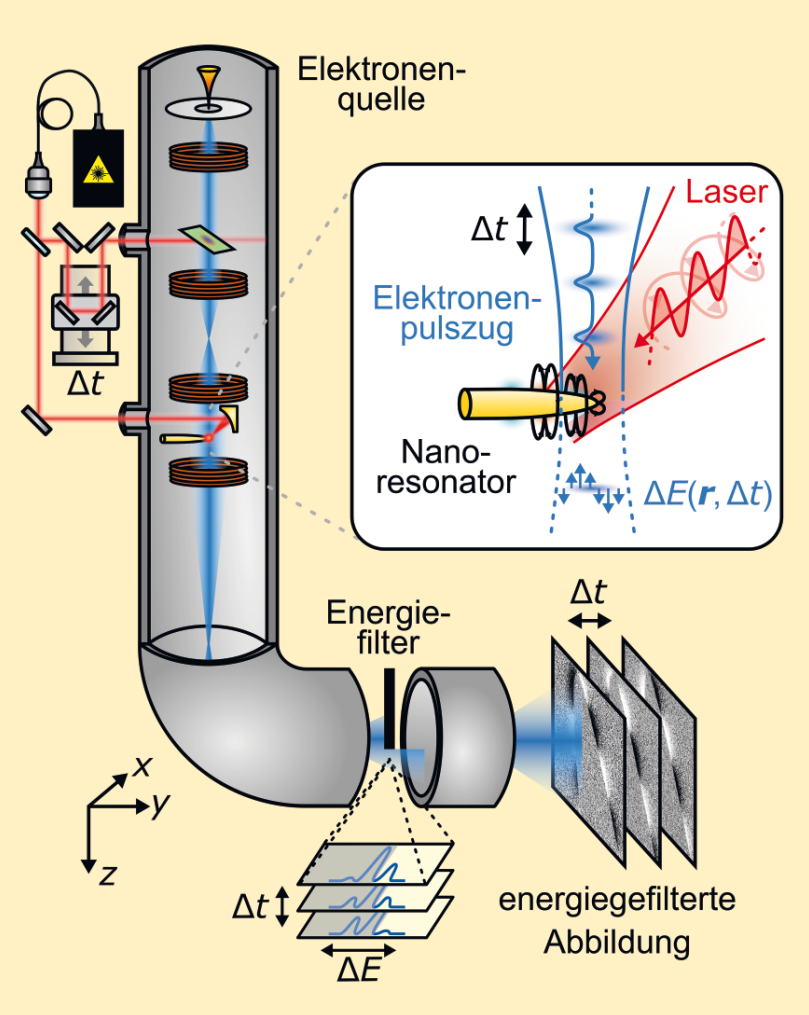
ABB. 1 | PROZESSE UND MESSMETHODEN



Fundamentale physikalische Prozesse und deren räumliche und zeitliche Skalen. Farblich unterlegt sind aktuell verfügbare Messmethoden dargestellt, also die Laserspektroskopie (rot), die Röntgenbeugung (blau) und die Elektronenmikroskopie (grün). Die meisten Prozesse oberhalb der gestrichelten Linie bei einer Femtosekunde können mit den bisherigen experimentellen Ansätzen nicht als Film in Raum und Zeit erfasst werden, weil entweder die zeitliche oder die räumliche Auslösung zu gering ist. Unsere kürzlich gelungene Entwicklung der Attosekunden-Elektronenmikroskopie (grüner Pfeil) ermöglicht aber nun einen Zugang zur raumzeitlichen Entwicklung solcher Prozesse.

© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

ABB. 2 | ATTOSEKUNDEN-ELEKTRONENMIKROSKOPIE



Konzept und schematischer Aufbau unseres Attosekunden-Elektronenmikroskops (Abbildung 1). Ein Dauerstrichlaser (rot) moduliert den kontinuierlichen Elektronenstrahl (blau) eines Transmissions-Elektronenmikroskops (grau) an einer ultradünnen dielektrischen Membran (grün) in eine Sequenz von Attosekundenpulsen. Ein zweiter Teil des Laserstrahls regt das zu untersuchende Objekt (gelb) an und erzeugt dort orts- und zeitabhängige Energieänderungen ΔE(r, Δt) im Elektronenstrahl (siehe vergrößerten Ausschnitt). Durch eine energiegefilterte Abbildung und Variation der Zeitverzögerung Δt zwischen den beiden Laserpfaden kann man dann die elektromagnetische Antwort der Probe als Film in Raum und Zeit messen.

Durch Propagation der so modulierten Elektronen zur Probe verwandelt sich der Elektronenstrahl in eine Abfolge von Attosekunden-Elektronenpulsen [2], mit denen wir die ultraschnellen Prozesse und Materialreaktionen am Probenort mit Attosekunden- und Nanometer-Auflösung abfragen können.

Das Messprinzip ist in Abbildung 2 genauer dargestellt. Der Strahl eines Dauerstrichlasers (rot) wird in zwei Pfade aufgeteilt und an zwei verschiedenen Stellen in das Transmissions-Elektronenmikroskop (grau) geleitet. Der erste Teil des Laserstrahls moduliert den kontinuierlichen Elektronenstrahl (blau) in eine Sequenz von Attosekunden-Elektronenpulsen. Hierzu brauchen wir eine ultradünne dielektrische Membran (grün), um Energie- und Impulserhaltung zu erreichen, und deren Funktionsweise wir in „Elektronenpulse mit dielektrischen Membranen“ erklären [3, 4]. Der zweite Teil des Laserstrahls triggert die zu untersuchende Dynamik im Probensystem (gelb). Der vergrößerte Ausschnitt in Abbildung 2 zeigt am Beispiel eines Nanoresonators die ultraschnelle Anregung von elektromagnetischen Nahfeldern (orange, türkis) in den optischen Zyklen des Laserlichts (rot). Je nach Ankunftszeitpunkt werden die Attosekunden-Elektronen (blau) in den im Vergleich zeitlich eingefrorenen Nahfeldern beschleunigt oder abgebremst, wodurch sich die Energie $\Delta E(r, \Delta t)$ der Elektronen als Funktion von Raum und Zeit verändert (r und Δt).

Ein magnetisches Spektrometer im Elektronennmikroskop, das via 90°-Kurve angeschlossen ist, trennt dann die Elektronen im Bild spektral auf, und ein Spalt filtert nur solche Elektronen zur Bildgebung heraus, die an der Probe Energie hinzugewonnen haben. Die energiegefilterte Abbildung zeigt dann die räumliche Verteilung der zeitlich eingefrorenen elektrischen Nahfelder in und um die Probe herum zum gewählten Zeitpunkt Δt. Durch Variation von Δt durch mikromechanisches Verschieben eines Spiegels im optischen Pfad des oberen Laserstrahls (graue Pfeile) können wir dann ein Film der Dynamik an der Nanostruktur mit Attosekunden-Zeitauflösung aufnehmen.

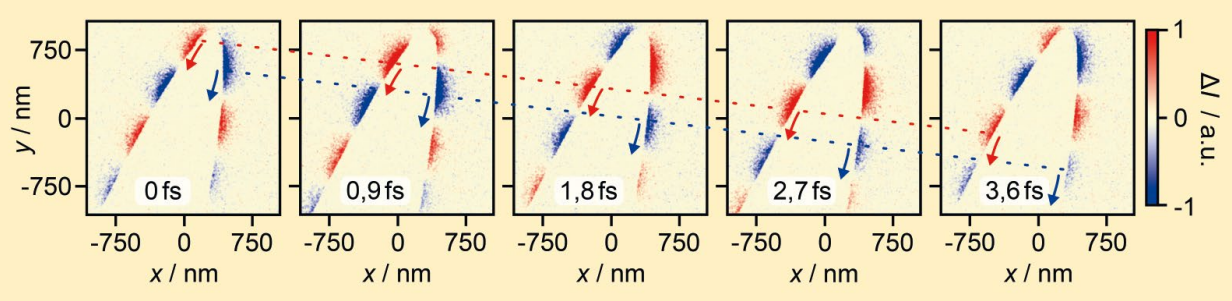
Zeitaufgelöste Messung elektromagnetischer Felder

Extrem scharf zulaufende Metallnadeln mit einem Spitzenradius von nur wenigen Nanometern haben vielfältige Anwendungen in der klassischen und ultraschnellen Elektronenmikroskopie, aber auch in der Nanoplasmonik, wo sie in Nahfeld-Rasterelektronenmikroskopen zur Oberflächenanalyse eingesetzt werden. Die gekrümmte Oberfläche unserer Wolframnadel und ihr kleiner Radius von 150 nm ermöglichen die Ausbildung von komplizierten Oberflächenwellen in Form von Plasmon-Polaritonen. Dies sind kollektive Ladungsträgeroszillationen im Plasma des Metalls an der Grenzfläche zwischen Material und Vakuum. Mit unserem Attosekunden-Elektronenmikroskop können wir nun die Propagation entlang der Nadelspitze in Raum und Zeit filmen, wie in Abbildung 3 gezeigt. Echte Zeitlupenfilme der gemessenen Dynamik sind im Zusatzmaterial unserer Originalarbeit zu finden [1].

In der Optik können kleine nanostrukturierte Resonatoren dazu verwendet werden, um Amplitude und Phase mehr oder weniger frei zu formen, wie in makroskopischen Antennen, aber auf den Längenskalen von Licht. Durch die geschickte Anordnung vieler solcher Resonatoren auf Oberflächen entstehen Metamaterialien, mit denen man makroskopische Effekte erzeugen kann, die mit natürlichen Materialien nicht zu erzielen sind. Beispiele sind flache Linsen, Tarnkappenschichten, Sensoren für chirale Moleküle, Lichtkondensatoren für Solarzellen oder quantenoptische

© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

ABB. 3 | ATTOFILME AN WOLFRAMNADEL



Bilder aus einem Filmbeispiel über die Licht-Materie-Wechselwirkung mit dem Attosekunden-Elektronenmikroskop. An einer Wolframnadel werden Plasmon-Polaritonen mit einem Laser angeregt und propagieren entlang der Oberfläche nach unten. Die Attosekunden-Elektronenmikroskopie liefert einen Film der elektrischen Felder (blau, rot) in Raum und Zeit.

Schaltkreise. An realistischen Metamaterialien kann allerdings in den meisten Fällen nur die optische Gesamtantwort gemessen werden, während die Funktionalität der einzelnen Resonatoren unklar bleibt. Zur effektiven Entwicklung solcher Strukturen müssen aber die Feld- und Emissionsdynamiken der einzelnen elementaren Resonator-Bausteine, der sogenannten Meta-Atome, besser verstanden werden. Außerdem muss man die zeitlichen Verzögerungen und Interferenzen zwischen mehreren Meta-Atomen bestimmen und berücksichtigen.

Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Anordnung von vier dielektrischen Schlitz-Resonatoren in einer verkippten, zickzackförmigen Geometrie. Die Schlitze sind in eine 200 nm dicke Silizium-Membran hineingefräst und sind jeweils 500 nm lang und 80 nm breit. Eine zickzackförmige Anordnung von solchen Lichtantennen hat potenzielle Anwendungen im Gebiet der Metalinsen, mit denen sich Licht effektiv fokussieren lässt, ohne dass eine makroskopisch dicke Struktur von Nöten wäre. Abbildung 4 zeigt Einzelbilder eines Films der optischen Felder in unserer Probe aus unserem Attosekunden-Elektronenmikroskop. Wir sehen, dass innerhalb aller Schlitze Nahfeldresonanzen auftreten, wie in Radioantennen, aber auf Dimensionen unterhalb der Wellenlänge von Licht!

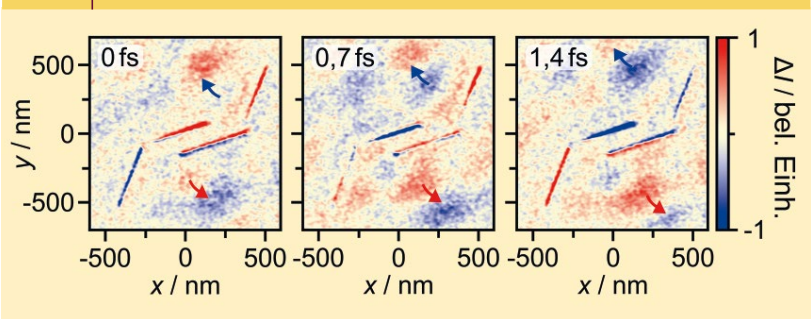
Wir beobachten außerdem, wie um die Nanoantennen herum ein komplexes, dynamisches Interferenzmuster der abgestrahlten Felder entsteht, welches die makroskopischen optischen Eigenschaften bestimmt und diese definiert. Unter anderem sehen wir einen zeitlichen Symmetriebruch zwischen der oberen und der unteren Hälfte, der durch eine nichtplanare Lasereinstrahlung erzeugt wird. Unsere Attosekunden-Elektronenmikroskopie kann also nicht nur die Funktionalität einzelner Antennen vermessen, sondern auch die kollektiven optischen Antworten von nanophotonischen Überstrukturen auf ihre elementaren Bestandteile zurückführen. Unser Messprinzip kann deshalb dazu beitragen, neuartige und bessere nanophotonische Metamaterialien für Forschung und Anwendung zu entwickeln und ihre Funktionsweise genauer zu verstehen.

Ausblick und mögliche Anwendungsfelder

Diese Resultate sind als Machbarkeitsnachweis zu werten, also als eine erste Demonstration der neuen Fähigkeiten unseres Attosekunden-Elektronenmikroskops an ausgewählen Beispielen aus der Optik und Nanophotonik. Wir glauben aber, dass die Attosekunden-Elektronenmikroskopie und die mit ihr mögliche Analyse von Licht-Materie-Wechselwirkung als Funktion von Raum und Zeit viel weitreichendere Anwendungsfelder erschließen kann.

Beispielsweise besteht ein langjähriges Ziel der Chemie darin, die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen durch den Einsatz von Katalysatoren zu steigern und zu kontrollieren. Jedoch erfordern die meisten industriellen Katalyseprozesse hohe Temperaturen und/oder Drücke und sind oft eingeschränkt in Bezug auf Reaktivität, Selektivität und Stabilität. Ein aufstrebendes Forschungsgebiet in der Katalyse ist die Nutzung von Plasmonenresonanzen in metallischen Nanoresonatoren (Abbildung 3), von denen erwartet wird, dass sie die Geschwindigkeit und Selektivität von photokatalytischen Reaktionen positiv beeinflussen. Diese Forschung an der Schnittstelle zwischen Chemie, Plasmo-

ABB. 4 | FELDDYNAMIK IN METAMATERIAL



Felddynamik in einem dielektrischen Metamaterial. Sowohl die Funktionalität der einzelnen Nanoresonatoren als auch deren kollektive Antwort im Fernfeld können wir mit unserem Attosekunden-Elektronenmikroskop vermessen. Das Resultat ist ein Film in Raum und Zeit, aus dem hier Einzelbilder gezeigt sind. Balken rechts: Farbkodierung der auf Eins normierten Feldamplitude.

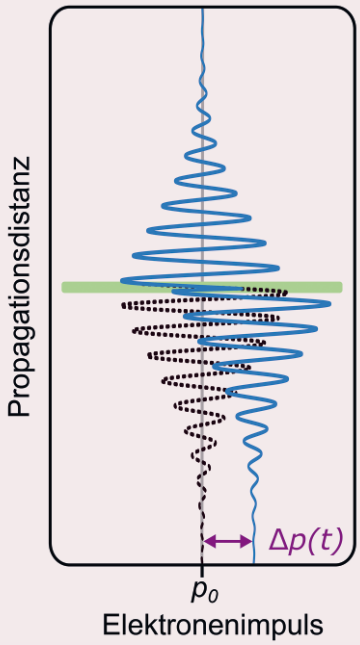
© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

ELEKTRONENPULSE MIT DIELEKTRISCHEN MEMBRANEN

Wie kann ein Elektron von Laserlicht in Attosekundenpulse moduliert werden, unter Erhaltung von Energie und Impuls? Betrachtet man ein Elektron als klassisches Punktteilchen, dann erfährt dieses beim Durchlaufen des elektromagnetischen Feldes in einem Laserfokus eine periodische Impulsmodulation, denn es wird von den Zyklen des Lasers periodisch beschleunigt und abgebremst. Dieser Effekt mittelt sich im freien Raum nach Durchlaufen des gesamten Laserstrahls wegen der zeitlichen Symmetrie jedoch heraus (schwarz gestrichelte Linie), und das Elektron hat wieder den ursprünglichen Impuls p_0 [3].

Das Einbringen einer dünnen dielektrischen Membran (grün) bricht aber die zeitliche Symmetrie der Interaktion, weil sich Phase und Stärke des elektromagnetischen Feldes auf beiden Seiten der Membran unterscheiden, sodass eine endliche Impulsänderung Δp entsteht (lila). Der finale Impuls $p(t)$ wird eine Funktion der ursprünglichen Ankunftszeit t des Elektrons an der Membran. Der kontinuierliche Elektronenstrahl im Elektronenmikroskop wird also sinusförmig mit der Frequenz des elektromagnetischen Feldes moduliert.

Im weiteren Verlauf holen die zu einem späteren Zeitpunkt beschleunigten Elektronen die zu einem früheren Zeitpunkt abgebremsten Elektronen ein, sodass sich ein Attosekunden-Elektronenpulszug formiert [1, 2]. Wenn man den Effekt quantenmechanisch betrachtet, entstehen außerdem temporale Talbot-Effekte und Qubit-Eigenschaften [4].



Physik der Elektronenimpulsmodulation an einer dielektrischen Membran. Ein Laserfeld moduliert den Vorwärtsimpuls p_0 eines Elektrons periodisch. Ohne Membran (grün) gibt es aber keinen bleibenden Impulsübertrag (schwarz gestrichelt). Mit Membran erfährt das Elektron (blau) aber eine endliche, zeitabhängige finale Impulsänderung Δp (lila), weil optische Phasenverschiebungen des Laserlichts im Inneren der Membran die optischen Oszillationen zeitlich asymmetrisch machen. Je nach Ankuftszeit an der Membran wird ein Elektron also beschleunigt oder gebremst.

nik und Quantenelektrodynamik will heiße Ladungsträger in Nanomaterialien nutzen, um chemische Reaktionen gezielt zu steuern. Entscheidend ist dabei die Verteilung und Dynamik der laserinduzierten optischen Nahfelder in und um die Resonatoren.

Da sich die Nanophotonik zunehmend der atomaren Grenze nähert, ergeben sich eine Reihe von neuartigen Fragestellungen; gleichzeitig sind die Zeitskalen der relevanten plasmonischen Zerfallsprozesse vergleichbar mit der Dauer der Oszillationsperiode des anregenden Lichts, was dem Problem eine zusätzliche dynamische Komponente verleiht. Hier könnte unsere Attosekunden-Elektronenmikroskopie entscheidend beitragen, weil nanoskopische Felder und ihre Attosekundendynamik mit atomarer Auflösung experimentell vermessen werden können, um den Einfluss der lokalen optischen Feldern auf chemische Prozesse in Echtzeit zu verstehen und so die Entwicklung effektiverer Katalysatoren zu unterstützen.

Ein weiteres Forschungsgebiet, in dem wir bedeutenden praktischen Nutzen erwarten, ist die ultraschnelle Informationsverarbeitung. Unser Wunsch nach immer kleineren und immer schnelleren elektronischen Schaltkreisen, ultimativ bei der Frequenz von Licht, führt zu einem fundamentalen Problem: Wie soll ein weltschnellster Prototyp eigentlich vermessen werden, wenn elektronische Methoden selbst offensichtlich zu langsam sind? Wir meinen, dass die ultraschnelle Elektronenmikroskopie hier ein entscheidendes Werkzeug werden kann, weil elektronenoptische Messmethoden in der Chipherstellung bereits jetzt Standard in der Qualitätskontrolle sind und einer Erweiterung um Zeitauflösung grundsätzlich nichts im Wege steht.

Neben der hier gezeigten Nutzung von kontinuierlichem Laserlicht [2] zur Formung von Attosekundenpulsen im Elektronenmikroskop können auch gepulse Laser verwendet werden [3], um stärkere Anregungen auf Kosten der mittleren Signalstärke zu erreichen [5, 6]. Bald begutachtet erscheinende Publikationen aus anderen Arbeitsgruppen zeigen bereits erweiterte Möglichkeiten und Anwendungen mit Bezug zur hier vorgestellten Idee, zum Beispiel in der ultraschnellen Rasterelektronenmikroskopie [5] oder in der Attosekunden-Elektroneninterferometrie [6]. Nächste Schritte zur weiteren Optimierung der Messmethode in unseren Laboratorien sind unter anderem die Verbessung des Signal-Rausch-Verhaltens mittels optimierter Modulationsmembranen, die Kombination mit einer Femtosekunden-Probenanregung für die Anregung von nichtlinearen optischen Antworten in Nanostrukturen sowie die Messung von seitlichen und magnetischen Feldern mit der Elektronen-Tomographie.

Wichtig bei diesen Aktivitäten erscheint uns, dass das Elektronenmikroskop eines der vielseitigsten Messgeräte unserer Zeit ist, und der Laser ebenso. Daher erwarten wir ein sehr breites Spektrum von Anwendungen unserer neuen Messmethode auf diverse Fragestellungen der modernen Physik, um beispielsweise die grundlegenden Mechanismen von optischen Bauelementen, Lasern, Metamaterialien, chemischen Reaktionen, Solarzellen oder der Photokatalyse auf atomaren Dimensionen zu verstehen.

Zusammenfassung

Mit der Attosekunden-Elektronenmikroskopie können optische Antworten und elektronische Reaktionsmechanismen in komplexen Materialien direkt in Raum und Zeit gefilmt werden. Wir erreichen dabei simultan eine räumliche Auflösung im Bereich einzelner Nanometer sowie eine Zeitauflösung im Attosekunden-Bereich, schneller als die Oszillationen von Licht. Die Leistungsfähigkeit dieser Methode demonstrieren wir an einigen nanophotonischen Metamaterialien. Sie ist darüber hinaus zum Beispiel in der Katalysatorforschung oder der Entwicklung neuer elektronischer Schaltkreise anwendbar.

© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

Stichwörter

Ultraschnelle Elektronenmikroskopie, Attosekunden-Physik, Licht-Materie-Wechselwirkung, Metamaterialien, Nanophotonik, Katalyse, Elektronik.

Anmerkung

Teile dieses Textes und der Abbildungen sind übernommen aus der Doktorabeit von David Nabben, Universität Konstanz, 2024. Die Entwicklung der Attosekunden-Elektronenmikroskopie wurde mit dem Helmholtz-Preis 2024 gewürdigt.

Danksagung

Open-Access-Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

[1] D. Nabben et al., Nature **2023**, *619*, 63.
[2] A. Ryabov et al., Sci. Adv. **2020**, *6*, eabb 1393.
[3] Y. Morimoto, P. Baum, Nat. Phys. **2018**, *14*, 252.
[4] M. V. Tsarev, A. Ryabov, P. Baum, Phys. Rev. Res. **2021**, *3*, 043033.
[5] J. H. Gaida et al., arXiv:2305.03005, **2023**.
[6] T. Bucher et al., arXiv:2305.04877, **2023**.

Die Autoren

David Nabben ist Postdoktorand am Lehrstuhl für Licht und Materie von Peter Baum an der Universität Konstanz. Im Rahmen seiner Promotion hat er das weltweit erste Attosekunden-Elektronenmikroskop entwickelt und zum Einsatz gebracht. Seine derzeitige Forschung konzentriert sich auf die Messung von Elektron-Licht-Materie-Wechselwirkungen in komplexen Festkörpermaterialien.

Joel Kuttruff ist Doktorand am Lehrstuhl für Licht und Materie von Peter Baum an der Universität Konstanz. Nach Forschung in Arbeitsgruppen am Imperial College London, an den Universitäten in Luxemburg und Tours beschäftigt er sich aktuell mit der Kontrolle von Elektronenimpulsen mit den Zyklen von Licht und Terahertzstrahlung.

Peter Baum ist Professor für Physik an der Universität Konstanz. Nach seiner Promotion an der Ludwig-Maximilians-Universität München war er Postdoktorand bei Ahmed Zewail am Caltech und Juniorgruppenleiter bei Ferenc Krausz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Derzeit forscht er zur Wechselwirkung von Licht und Materie auf kleinsten Raum- und Zeitdimensionen mit Elektronenpulsen unter Kontrolle von Laserlicht.

Anschrift
Dr. David Nabben, Joel Kuttruff, Prof. Dr. Peter Baum, Universität Konstanz, Universitätsstr. 10, 78464 Konstanz. david.nabben@uni-konstanz.de, joel.kuttruff@uni-konstanz.de, peter.baum@uni-konstanz.de

© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH