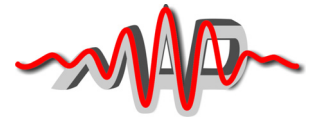




PRESSE-INFORMATION
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
und
Munich-Centre for Advanced Photonics



Garching, 05.12.12

Steuerung elektrischer Signale mit Lichtfrequenzen

Untersuchungen von isolierenden Stoffen mit Femto- und Attosekundenpulsen stellen elektronische Schaltgeschwindigkeiten bis in den Petahertzbereich in Aussicht.

Die moderne elektronische Informationsverarbeitung erreicht heute bereits atemberaubend hohe Geschwindigkeiten von bis zu 100 Milliarden Schaltvorgängen in der Sekunde. Neue Ergebnisse aus dem Labor für Attosekundenphysik (LAP) von Prof. Ferenc Krausz (Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) und Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU)) könnten den Weg zu einer um mehrere Größenordnungen schnelleren Verarbeitung ebnen. Ein Team von LAP-Wissenschaftlern zeigte in zwei bahnbrechenden und sich ergänzenden Experimenten, dass unter bestimmten Bedingungen hochintensive und extrem kurze Lichtpulse in normalerweise isolierenden dielektrischen Materialien elektrische Ströme induzieren können (*Nature*, AOP, 5. Dezember 2012). Dabei fanden sie deutliche Hinweise darauf, dass die schnellen Schwingungen des Lichtfeldes die elektrischen und optischen Materialeigenschaften unmittelbar verändern, und dass diese Änderungen auf einer Zeitskala von wenigen Femtosekunden ($1 \text{ Femtosekunde} = 10^{-15} \text{ s}$) rückgängig gemacht werden können (*Nature*, gleiche Ausgabe). Das eröffnet die Perspektive, Signalverarbeitungsraten bis in den Petahertz-Bereich zu erreichen, das wäre etwa 10 000mal schneller als es die besten halbleiterbasierten Mikrochips heutzutage ermöglichen. Die Experimente wurden von Wissenschaftlern des MPQ, der LMU und der Technischen Universität München durchgeführt, in enger Zusammenarbeit mit Theoretikern aus der Gruppe von Prof. Mark Stockman (Georgia State University, Atlanta, USA).

Die Festkörperphysik teilt Stoffe hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften in drei Gruppen ein. Metalle verfügen grundsätzlich über freie Ladungsträger, sprich Elektronen, und leiten daher auch bei sehr kleinen Feldstärken elektrischen Strom. In Halbleitern benötigen die Ladungsträger erst einen gewissen Energieschub, um sich frei bewegen zu können. Dies macht sie geeignet als Ausgangsmaterial für Schaltelemente, in denen die digitalen Zustände „0“ und „1“ durch „Strom ein“ und „Strom aus“ repräsentiert werden. In den besten derzeit zur Verfügung stehenden siliziumbasierten Halbleiterbauelementen kann zwischen diesen beiden Zuständen mehrere Milliarden mal in der Sekunde, also mit einer Rate von einigen Gigahertz ($1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$) hin und hergeschaltet werden, das entspricht der Frequenz von Mikrowellen.

Bei der dritten Gruppe, den sogenannten Dielektrika, sind die Elektronen nahezu unbeweglich, weshalb die Stoffe gewöhnlich Isolatoren sind – bei kleinen elektrischen Feldern leiten sie keinen Strom, bei hohen statischen Feldern kommt es zu irreversiblen Materialschäden. Das Team von Prof. Krausz ging nun der Frage nach, wie solche Materialien reagieren, wenn sehr hohe, im statischen Fall zerstörerische Feldstärken nur einen winzigen Moment lang einwirken. Als Werkzeuge dafür dienen ihnen sehr kurze Laserpulse im sichtbaren/Nahen Infrarot-Bereich, mit einer Dauer von nur wenigen Femtosekunden (das ist ein Millionstel von einem Milliardstel einer Sekunde), die gerade mal ein paar Feldschwingungen mit perfekt kontrollierter Wellenform enthalten. Innerhalb eines solchen Lichtpulses wächst die Amplitude des elektrischen Feldes extrem schnell, d.h. innerhalb weniger Femtosekunden, von moderaten Werten auf mehr als 10 Milliarden Volt pro Meter an.

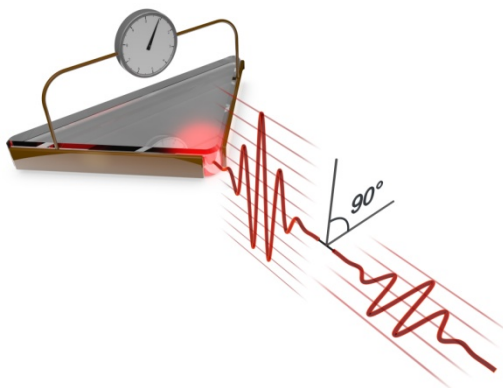
Das erste Experiment [1] ermittelte, ob Dielektrika unter dem Einfluss solcher Lichtpulse elektrischen Strom leiten können. Dazu wurde ein kleines Prisma aus Quarzglas auf zwei Seiten mit

Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Dr. Olivia Meyer-Streng
Tel.: +49-89-32905-213
E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de
Hans-Kopfermann-Str. 1, D-85748 Garching

Munich-Centre for Advanced Photonics
Public Outreach
Thorsten Naeser / Christine Kortenbruck
Tel.: +49-89-32905-124 / +49-89-289-14096
E-Mail: thorsten.naeser@mpq.mpg.de
E-Mail: christine.kortenbruck@munich-photonics.de

Goldelektroden bedampft, wobei ein rund 50 Nanometer breiter Spalt zwischen den Elektroden frei blieb. Während der Bestrahlung des Prismas mit den intensiven Femtosekundenpulsen wurde zwischen den Elektroden ein elektrischer Strom gemessen. „Zu diesem Ergebnis tragen zwei Effekte bei“, erklärt Tim Paasch-Colberg, Doktorand an diesem Experiment. „Mit einem starken Lichtpuls erhöhen wir zunächst die Beweglichkeit der Elektronen in dem Prisma. Bei einem zweiten, schwächeren Puls wählen wir die Schwingungsrichtung so, dass er die bereits mobilisierten Elektronen auf die Goldelektroden schiebt.“ Die Messungen ergaben, dass der elektrische Strom seine Richtung änderte, sobald das Feld des schwächeren, treibenden Pulses um eine halbe Wellenperiode (etwa 1,2 fs) in Bezug auf das starke Feld des mobilisierenden Feldes verzögert wurde (siehe Abb. 1). „Dieses Verhalten ist ein starker Hinweis darauf, dass das Material durch den Einfluss des starken Lichtfeldes von einem Isolator zu einem elektrischen Leiter wird, und zwar in weniger als einer Femtosekunde“, meint Tim Paasch-Colberg. „Allerdings lassen die Messungen die Frage offen, ob die Leitfähigkeit genauso schnell wieder abgeschaltet werden kann. Erst dann könnten die beobachteten Effekte dafür genutzt werden, elektrische Signale mit Lichtfrequenzen zu steuern und zu verarbeiten.“

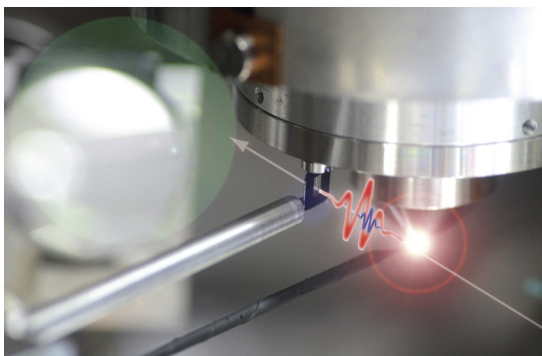
Abb. 1: Messung der durch die elektrischen Lichtfelder hervorgerufenen elektrischen Ströme



Bei diesem Grundlagenexperiment von Schiffrin et al. wird ein kleines Prisma auf zwei Seiten mit Goldelektroden bedampft, zwischen denen ein etwa 50 Nanometer breiter Spalt frei bleibt. Diese Probe wird zunächst mit einem starken Femtosekundenpuls aus nur wenigen Wellenzügen bestrahlt, der die Beweglichkeit der Elektronen erhöht. Die Schwingungen eines zweiten, wesentlich schwächeren Pulses schieben die Elektronen auf die Elektroden, was zu einem messbaren elektrischen Strom führt. Wird die Verzögerung zwischen den beiden Pulsen um genau eine halbe Wellenperiode des Laserfeldes (etwa 1,2 fs) verändert, dann kehrt der elektrische Strom seine Richtung um. Das ist ein Hinweis darauf, dass die „Mobilisierung“ der Elektronen innerhalb eines Zeitfensters von einer Femtosekunde erfolgt. **Grafik:** Christian Hackenberger, LMU

Dieser Frage ging ein weiteres Experiment [2] nach, das die zugrunde liegenden elektronischen Prozesse untersuchte. Diesmal wurde ein dünner Glasfilm mit den gleichen Pulsen wie oben bestrahlt. Die extrem schnellen, durch das starke elektrische Feld ausgelösten Schwankungen der optischen Eigenschaften verfolgen die Wissenschaftler in Echtzeit mit den weltweit einzigartigen Werkzeugen von LAP: Lichtblitze im extrem kurzwelligen Ultraviolett, die weniger als 100 Attosekunden lang dauern (eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer Milliardstel Sekunde, also tausendmal kürzer als eine Femtosekunde) (siehe Abb.2). „Unsere Messungen zeigen deutlich, dass die durch die Lichtpulse hervorgerufenen Änderungen hochgradig nichtlinear dem elektrischen Feld des Treiberpulses folgen. Das aber bedeutet, dass die hervorgerufenen Änderungen reversibel sind“, erläutert Elisabeth Bothschafter, die an diesem Experiment im Rahmen ihrer Doktorarbeit forscht. Und Dr. Martin Schultze, Leiter dieses Experiments und zur Zeit zu einem Forschungsaufenthalt an der University of Berkeley (USA), fügt hinzu: „Es ist für uns eine große Überraschung, dass grundlegende Eigenschaften von Stoffen wie z.B. ihre Polarisierbarkeit so schnell, d.h. mit der Geschwindigkeit von Lichtfrequenzen, sowohl erhöht als auch erniedrigt werden können.“

Abb. 2: Echtzeit-Beobachtung der Änderungen der elektronischen Eigenschaften eines Dielektrikum mit Attosekunden-Pulsen



Ein nanometrisch dünner Film aus Quarzglas (schwarzer Rahmen in der Bildmitte) wird mit intensiven Femtosekunden-Pulsen (rot) aus wenigen Wellenzügen bestrahlt. Die starken Felder eines Pulses ändern die elektronischen Zustände in dem Glas, und zwar mit jeder Periode der Schwingung. Diese schnellen Änderungen können in Echtzeit mit einer Serie von Schnappschüssen verfolgt werden. Dabei „durchleuchten“ Attokunden-Lichtblitze (blau) den Film zu verschiedenen Verzögerungszeiten, bezogen auf den Anregungspuls. Aus diesen Momentaufnahmen lassen sich die durch das Lichtfeld hervorgerufenen Änderungen wie in einem Zeitlupenfilm rekonstruieren. **Photo:** Thorsten Naeser, LMU

Die Ergebnisse beider Experimente können mit einem von Vadym Alpakov und Mark Stockman entwickelten theoretischen Modell beschrieben werden, das die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse auf der Basis der Quantenmechanik erklärt. Auch nach diesen Modellrechnungen sind die durch Licht hervorgerufenen Änderungen der Materialeigenschaften in vollem Umfang reversibel. „Unsere Arbeit zeigt, dass moderne Techniken der Photonik neue Möglichkeiten bereit halten, die Grenzen der Informationsverarbeitung auszuloten“, meint Dr. Agustin Schiffrin, Leiter des ersten Projektes und gegenwärtig Forscher an der University of British Columbia (Vancouver, Kanada) ist. Prof. Krausz, Leiter des Labors für Attosekundenphysik, stellt die Arbeiten in einen größeren Zusammenhang: „Wir hoffen, dass diese Resultate viele andere Labore und Gruppen weltweit dazu motivieren, mit uns zusammen weiterführende Untersuchungen durchzuführen, um die Realisierbarkeit der vielversprechenden Perspektive, elektronische Schaltungen auf Lichtfrequenzen zu beschleunigen, so zügig wie möglich zu erkunden.“

Olivia Meyer-Streng

Originalveröffentlichungen:

- 1) Agustin Schiffrin, Tim Paasch-Colberg, Nicholas Karpowicz, Vadym Apalkov, Daniel Gerster, Sascha Mühlbrandt, Michael Korbman, Joachim Reichert, Martin Schultze, Simon Holzner, Johannes V. Barth, Reinhard Kienberger, Ralph Ernstorfer, Vladislav S. Yakovlev, Mark I. Stockman, and Ferenc Krausz

Optical-field-induced current in dielectrics

Nature, Advanced Online Publication, 5. Dezember 2012, DOI: 10.1038/nature11567

- 2) Martin Schultze, Elisabeth M. Bothschafter, Annkatrin Sommer, Simon Holzner, Wolfgang Schweinberger, Markus Fiess, Michael Hofstetter, Reinhard Kienberger, Vadym Apalkov, Vladislav S. Yakovlev, Mark I. Stockman, and Ferenc Krausz

Controlling dielectrics with the electric field of light

Nature, Advanced Online Publication, 5. Dezember 2012, DOI: 10.1038/nature11720

Kontakt:

Dr. Olivia Meyer-Streng

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
Tel.: +49 (0) 89/ 32905 -213
Fax: +49 (0) 89/ 32905 -200
E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de

Prof. Ferenc Krausz

Lehrstuhl für Experimentalphysik, Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Hans-Kopfermann-Straße 1, Garching
Tel.: +49 (0) 89 32905 -600
Fax: +49 (0) 89 32905 -649
E-Mail: ferenc.krausz@mpq.mpg.de
www.attoworld.de

Prof. Mark Stockman

Chair of Theoretical Physics
Department of Physics and Astronomy
Georgia State University
29 Peachtree Center Ave.
Atlanta, GA 30302, USA
Tel.: +1-678-457-4739
E-Mail: mstockman@gsu.edu