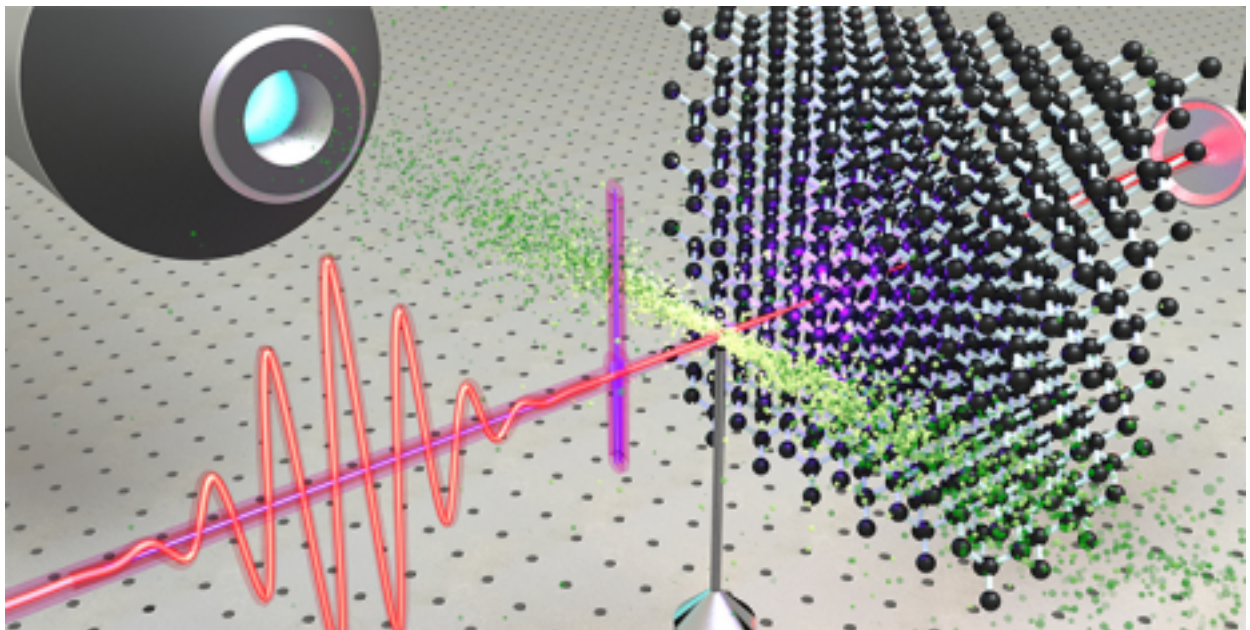


Elektronen am Tempolimit

26.08.2016 | News

Von: Oliver Morsch

Elektronische Bauteile werden seit Jahren immer schneller und machen damit leistungsfähige Computer und andere Technologien möglich. Wie schnell sich Elektronen mit elektrischen Feldern letztendlich kontrollieren lassen, haben jetzt Forscher an der ETH Zürich untersucht. Ihre Erkenntnisse sind wichtig für die Petahertz-Elektronik der Zukunft.



Ein kurzer Laserpuls wandert durch einen Diamanten (schwarze Kugeln) und regt dort Elektronen an. Die Stärke der Anregung wird mittels eines Attosekunden-Ultraviolettimpulses (violett) gemessen. (Illustration: Matteo Lucchini / ETH Zürich)

Geschwindigkeit mag keine Hexerei sein, doch sie ist die Grundlage für Technologien, die nicht selten wie Magie anmuten. Moderne Computer etwa sind so leistungsfähig, weil in ihnen winzige Schaltelemente elektrische Ströme in Bruchteilen einer Milliardstel Sekunde steuern. Die unglaublichen Datenflüsse des Internet wiederum sind nur möglich, weil äusserst schnelle elektro-optische Modulatoren Informationen in Form sehr kurzer Lichtpulse durch Glasfaserkabel schicken.

Bereits heute arbeiten elektronische Schaltkreise routinemässig mit Frequenzen von mehreren Gigahertz (eine Milliarde Schwingungen pro Sekunde) bis hin zu Terahertz (eine Billion Schwingungen). Die nächste Generation der Elektronik wird daher über kurz oder lang in den tausendmal schnelleren Petahertz-Bereich vorstossen müssen. Ob und wie sich Elektronen allerdings derart schnell kontrollieren lassen, ist bislang noch weitgehend unbekannt. Ein Team um ETH-Professorin

Ursula Keller hat nun in einem grundlegenden Experiment untersucht, wie Elektronen auf Petahertz-Felder reagieren.

In ihrem Experiment setzten Keller und ihre Mitarbeiter ein winziges, nur 50 Nanometer dickes Stück Diamant einem wenige Femtosekunden (d.h., den Millionstel Teil einer Milliardstel Sekunde) dauernden Laserpuls im Infrarotbereich aus. Das elektrische Feld dieses Laserlichts, das eine Frequenz von etwa einem halben Petahertz aufweist, schwang in dieser kurzen Zeit fünfmal hin und her und regte so die Elektronen an. Grundsätzlich lässt sich die Wirkung elektrischer Felder auf Elektronen in durchsichtigen Materialien indirekt messen, indem man Licht durch das Material schickt und beobachtet, wie stark es von diesem absorbiert wird. Während solche Messungen für konstante elektrische Felder einfach sind, stellen die extrem rasch schwingenden Felder eines Laserstrahls die Forscher vor eine schwierige Aufgabe. Im Prinzip sollte das Licht, mit dem die Absorption gemessen wird, nur jeweils für einen Bruchteil der Schwingungsperiode des elektrischen Feldes angeschaltet werden. Dies aber bedeutet, dass ein solcher Mess-Puls weniger als eine Femtosekunde dauern darf. Zudem muss genau bekannt sein, in welcher Schwingungsphase sich das elektrische Feld des Laserpulses befindet, wenn der Mess-Puls eingeschaltet wird.

Grundstein aus den Neunziger Jahren

Den Grundstein für die Lösung dieser Probleme legte Kellers Team bereits Ende der Neunziger Jahre. «Damals zeigten wir erstmals, wie sich die Schwingungsphase eines Femtosekunden-Laserpulses präzise stabilisieren lässt», erklärt Keller, «was wiederum die Voraussetzung für die Erzeugung von Attosekunden-Laserpulsen ist». Diese Technik wurde seitdem verfeinert und erlaubt es den Forschern heute, Lichtpulse im extremen Ultraviolettbereich mit Wellenlängen von circa 30 Nanometern herzustellen, die nur einen Bruchteil einer Femtosekunde andauern und zudem perfekt mit der Schwingungsphase eines Infrarotpulses synchronisiert sind. In ihren neuesten Experimenten benutzten die ETH-Forscher ein solches Laserpuls-Gespann, um mit dem elektrischen Feld des Infrarotpulses die Elektronen im Diamanten anzuregen und gleichzeitig die daraus resultierenden Absorptionsänderungen mit dem Attosekunden-Ultraviolett-puls zu messen. Tatsächlich sahen sie, dass sich diese im Rhythmus des schwingenden elektrischen Feldes des Infrarot-Laserpulses auf charakteristische Weise änderte.

Um allerdings im Detail zu verstehen, was dabei innerhalb des Diamanten vor sich ging, war noch einige Detektivarbeit nötig. Zunächst simulierten Forscher um Katsuhiko Yabana an der Tsukuba University in Japan in Zusammenarbeit mit den ETH-Physikern die Reaktion der

Diamant-Elektronen auf den Infrarotpuls mithilfe eines Supercomputers und fanden dasselbe Absorptionsverhalten, das in Zürich gemessen wurde. Diese Simulationen enthielten das komplexe Zusammenspiel der Elektronen im Kristallgitter des Diamanten, das sich in einer Vielzahl so genannter Energiebänder niederschlägt, in denen sich die Elektronen befinden können. «Der Vorteil der Simulationen gegenüber dem Experiment ist aber, dass man verschiedene dieser Effekte, die im realen Diamanten auftreten, ein- und ausschalten kann», sagt Matteo Lucchini, Postdoc in Kellers Arbeitsgruppe, «sodass wir schliesslich das charakteristische Absorptionsverhalten des Diamanten auf nur zwei Energiebänder zurückführen konnten».

Tempolimit im Petahertz-Bereich

Diese Erkenntnis war letztendlich entscheidend für die Interpretation der Messdaten. Aus ihr konnten die Forscher folgern, dass der dynamische Franz-Keldysh Effekt für die Absorption im Diamanten unter Einfluss des Infrarot-Laserpulses verantwortlich war. Während der Franz-Keldysh Effekt für statische elektrische Felder seit Jahren bekannt und gut verstanden ist, war sein dynamisches Gegenstück für extrem schnell schwingende Felder bisher noch nie beobachtet worden. «Der Umstand, dass wir diesen Effekt auch bei Petahertz-Anregungsfrequenzen immer noch sehen können, bestätigte uns, dass sich die Elektronen tatsächlich am Tempolimit des Petahertz-Laserfeldes beeinflussen lassen», erklärt Lukas Gallmann, Senior Scientist in Kellers Labor.

Die dynamische Wechselwirkung ist auch von grundlegendem Interesse, da sie in einem Bereich auftritt, der weder klar von quantenmechanischer noch klar von klassischer Licht-Materie-Wechselwirkung dominiert wird. Dies bedeutet, dass sowohl physikalische Effekte eine Rolle spielen, bei denen Licht in Form von Energiequanten (Photonen) ins Spiel kommt, als auch solche, in denen es ein klassisches elektromagnetisches Feld darstellt. Die nun publizierte Arbeit hat gezeigt, dass die Reaktion des Materials auf das optische Feld durch die Elektronenbewegung in einem einzelnen Energieband statt durch Übergänge zwischen verschiedenen Bändern dominiert wird. In ähnlichen Experimenten war bislang unklar, was genau vor sich geht, doch das ETH-Experiment hat jetzt in dieser Frage Klarheit geschaffen.

Von hier bis zur Petahertz-Elektronik ist es zwar noch ein weiter Weg, und andere physikalische Effekte könnten zudem leistungsbeschränkend wirken. Gallmann weist aber darauf hin, dass die neuen Ergebnisse in mehrfacher Hinsicht relevant sind, da sie zeigen, dass man bei solche hohen Frequenzen noch immer Elektronen mit elektrischen Feldern steuern und schalten kann. Lucchini fügt hinzu:

«Diamant ist ein wichtiges Material, das in einer Vielzahl von Technologien von der Optomechanik bis hin zu Biosensoren Anwendung findet. Ein genaues Verständnis der Wechselwirkung mit Lichtfeldern, wie wir es jetzt erreicht haben, ist daher fundamental».

Literaturhinweis

Lucchini M, Sato SA, Ludwig A, Herrmann J, Volkov M, Kasmi L, Shinohara Y, Yabana K, Gallmann L, Keller U. Attosecond dynamical Franz-Keldysh effect in polycrystalline diamond. *Science* 26 Aug 2016: Vol. 353, Issue 6302, pp. 916-919, DOI: [10.1126/science.aag1268](https://doi.org/10.1126/science.aag1268)