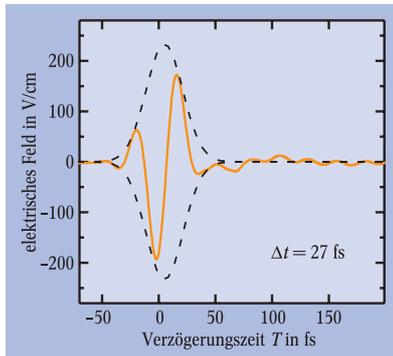


Schnappschuss im Halbleiter

Physiker von der TU München haben ein ultraschnelles Infrarot-Spektrometer entwickelt, mit dem sie erstmals den Aufbau eines abgeschirmten Coulomb-Potentials in einem Elektron-Loch-Plasma verfolgen konnten. Dieser ultraschnelle Prozess vollzieht sich innerhalb von nur etwa 100 fs.

Die optische Spektroskopie gibt uns Informationen über die Anregungszustände in Materie. Die Wellenlänge des Lichts bestimmt dabei, in welchem Energiebereich Resonanzen untersucht werden können. Kurze Laserpulse aus sichtbarem

Abb. 1: Der Infrarotpuls zur ultraschnellen Messung der Ladungsträger-Bewegung in einem Halbleiter dauert nur eine Schwingungsperiode. Gezeigt ist die elektrische Feldamplitude als Funktion der Zeit. Aus der Amplituden und Phasenverschiebung des Lichtfelds lassen sich die Eigenschaften des Elektron-Loch-Plasmas im Halbleiter ablesen.



Licht eignen sich zum Beispiel besonders gut für die Untersuchung der Dynamik von Elektron-Loch-Paaren in Halbleitermaterialien, deren Bandlücke einige Elektronenvolt beträgt. Das Arbeitspferd der Spektroskopiker auf diesem Gebiet ist der modengekoppelte Titan-Saphir-Laser mit seinen Wellenlängen im nahen Infrarot (um 800 nm bzw. 375 THz) und mit Pulsdauern zwischen 10 und 100 Femtosekunden. Dieser Laser hat in den letzten 10 Jahren viel zum Verständnis der Prozesse in optischen Halbleiter-Bauelementen, etwa in Laserdioden und Leuchtdioden, beigetragen.

Nun sind die Anregungen von Elektronen aus dem Leitungsband ins Valenzband und die anschließenden Dephasierungs- und Relaxationsprozesse bei weitem nicht die einzigen wichtigen Vorgänge im Halbleiter. Eine Reihe von Elementaranregungen und Resonanzen befindet sich im Energiebereich von 4 bis 400 meV, das entspricht einer Frequenz von 1 bis 100 THz oder Wellenlängen von 3 bis 300 Mikrometer. Zu diesen Zuständen zählen zum Beispiel die Gitterschwingungen im Festkörper (Phononen), kollektive Schwingungen freier Ladungsträger (Plasmonen) oder

Spin-Anregungen in Hochtemperatur-Supraleitern (Magnonen).

Dieser Energiebereich blieb der ultraschnellen Spektroskopie lange Zeit verschlossen. In den letzten Jahren wurden zwar ultraschnelle Spektrometer unterhalb etwa 3 THz und oberhalb von etwa 20 THz entwickelt, aber das breite Frequenzband von 3 bis 30 THz (10 bis 100 Mikrometer Wellenlänge) im mittleren und fernem Infrarot blieb ein schwer zugängliches Gebiet der Femtosekundenspektroskopie [1]. Jetzt haben Alfred Leitenstorfer und seine Gruppe an der TU München ein hochempfindliches Infrarotspektrometer entwickelt, das den gesamten Bereich von 1–100 THz erschließt und dabei eine beachtliche Zeitauflösung von 10 fs hat. In einem ersten Experiment konnten die Münchner zeigen, dass ihr Spektrometer ein ähnliches Potenzial hat wie der Titan-Saphir-Laser für die Spektroskopie im nahen Infrarot [2].

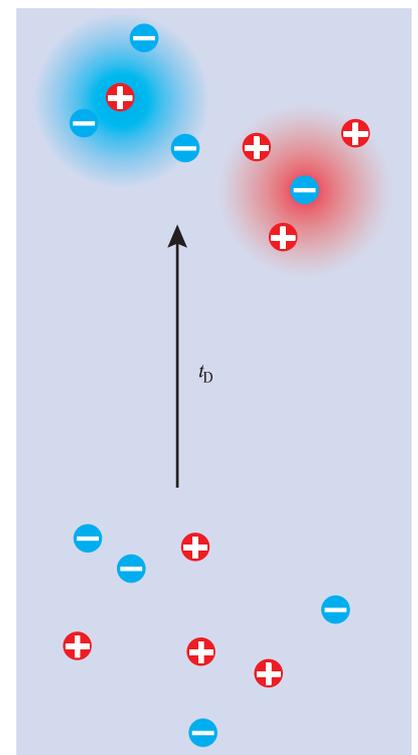
Um Licht der geeigneten Wellenlänge und Dauer zu erzeugen, schickten Leitenstorfer und seine Mitarbeiter einen 10 fs kurzen Laserpuls aus einem Titan-Saphir-Laser auf einen dünnen, optisch nichtlinearen GaSe-Kristall, der durch optische Gleichrichtung einen Puls von 27 fs Dauer bei einer Zentralfrequenz von 28 THz aussandte [3]. Abbildung 1 zeigt das elektrische Feld als Funktion der Zeit. Da die Feldamplitude gerade einmal eine einzige Schwingung durchläuft, spricht man auch von einem single-cycle-Puls. Aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation skaliert das Frequenzspektrum eines Laserpulses umgekehrt proportional zu dessen Dauer. Je kürzer der Puls umso breiter das Spektrum. Der in Abb. 1 gezeigte Puls hat Frequenzkomponenten von 3 bis 90 THz. Der Puls wird anschließend durch die zu untersuchende Probe gesandt und trifft auf einen elektrooptischen Kristall, der die Feldamplitude in ein elektronisch detektierbares Signal umwandelt.

Als erste Aufgabe für ihr neues Spektrometer suchten sich die Experimentatoren eine Vorhersage aus

Abb. 2: Der Übergang von einem unkorrelierten Ensemble nackter Ladungen zu abgeschirmten Quasi-Teilchen dauert etwa 100 fs. Die abgeschirmten Elektronen wechselwirken über kollektive Plasmonschwingungen.

der Quantenkinetik aus: Die positiven und negativen Ladungen in einem photogenerierten Nichtgleichgewichts-Plasma sollten laut Theorie innerhalb einer endlichen Zeit vom Zustand isolierter Einzelladungen in einen kollektiven, korrelierten Zustand übergehen, in ein so genanntes abgeschirmtes Ladungsträgerensemble. Dabei wirkt zwischen zwei Elektronen im Plasma nicht mehr die „nackte“ Coulomb-Abstoßung. Vielmehr ordnen sich positive Ladungen um die negativen Ladungen an und schirmen diese teilweise ab (Abb. 2). Dieser kollektive Zustand lässt sich zu Plasmaschwingungen anregen, deren Frequenz proportional zur Wurzel aus der Ladungsträgerdichte ist. Das Elektron-Loch-Plasma im Halbleiter ist nicht nur von akademischem Interesse. Vielmehr spielt die Wechselwirkung von Löchern und Elektronen auf kurzen Zeitskalen eine wichtige Rolle in Mikrochips und Frequenzfiltern von Computern, Handys und Navigationsgeräten.

Aus quantenkinetischen Simulationen war bekannt, dass die Zeitentwicklung der Plasmaresonanz in einem Halbleiter ein direktes Maß für die Korrelation der Ladungsträger und somit für den Aufbau der Abschirmungen darstellt [4]. Die Theorie war bereits durch die Analyse der ultraschnellen Dynamik von photogenerierten Interband-Kohärenzen bestätigt worden [5].



Um nun auch direkte Aussagen über die Zeitentwicklung des abgeschirmten Coulomb-Potentials zu erhalten, erzeugten Leitenstorfer und seine Mitarbeiter mit einem intensiven 10-fs-Laserpuls ein Plasma in einem GaAs-Kristall. Zur Diagnose strahlten sie anschließend den Spektrometer-Puls ein und registrierten die Feldamplitude hinter dem Kristall für verschiedene Verzögerungen zwischen Anregungspuls und Diagnose-Puls. Aus Veränderungen in Amplitude und Phase konnten die Wissenschaftler die dielektrische Funktion des Halbleiters ablesen, aus der sich alle Eigenschaften eines Festkörpers ergeben. Erst nach einer Verzögerungszeit von etwa 100 fs bildete sich eine scharfe Resonanz bei der erwarteten Frequenz von 15 THz heraus. Das entspricht bei 10^{18} angeregten Ladungsträgern pro cm^3 etwa der Zeit einer vollen Plasmaschwingung. Kurz nach der Interband-Anregung dominiert nackte Coulomb-Streuung. Diese geht dann äußerst schnell in eine abgeschirmte Coulomb-Streuung über, die vor allem durch Energiequanten der Plasmasoszillation bei 15 THz vermittelt wird.

Mit diesem Experiment konnte erstmals direkt der Aufbau von Vielteilchen-Korrelationen und -Wechselwirkungen auf der Femtosekundskaala gezeigt werden. Die neuen Ergebnisse und die vorgestellte experimentelle Technik eröffnen ein weites Feld zur Untersuchung von niederenergetischen Anregungen in Materie mit einer zeitlichen Präzision nahe am Limit der Unschärfe-Relation. Mit Spannung ist zu erwarten, wie mit dieser Methode innerhalb der nächsten Jahre wichtige zeitaufgelöste Analysen beispielsweise von Gerüstschwingungen großer Moleküle und biologischer Komplexe, oder auch von Korrelationen in Supraleitern gelingen werden.

HARALD GIESSSEN

- [1] R. A. Kaindl et al., *Science* **287**, 470 (2000)
- [2] R. Huber et al., *Nature* **414**, 286 (2001).
- [3] R. Huber et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3191 (2000)
- [4] L. Bányai et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 882 (1998)
- [5] W. A. Hügel et al., *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3313 (1999)

Prof. Dr. Harald Gießen, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn, Wegelerstraße 8, 53115 Bonn

Ein einzelnes Ion als optischer Detektor

Ein einzelnes Ion lässt sich mit elektromagnetischen Feldern in sogenannten Ionenfallen für nahezu unbegrenzte Zeit speichern. Wenn man es mit Laserlicht kühlt, kommt seine Bewegung praktisch zum Stillstand. Ein solches Teilchen stellt ein fast perfektes System für atomphysikalische und quantenoptische Untersuchungen dar. Hochpräzise Messungen von Übergangsfrequenzen, die zu neuen Atomuhren führen können [1, 2], oder Untersuchungen zur statistischen Verteilung des emittierten Lichtes nach Laseranregung [3, 4] sind Beispiele aus der jüngsten Zeit.

Der Nutzen eines einzelnen gespeicherten Ions als hochauflösender Detektor für ein optisches Feld wurde jüngst in einer Arbeit aus dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching von der Arbeitsgruppe von H. Walther demonstriert [G. R. Guthörlein et al., *Nature* **414**, 49, (2001)]. Hier wurde ein einzelnes Ca^+ -Ion in einer linearen Paul-Falle gespeichert. Diese besteht aus vier stabförmigen Elektroden, an die ein elektrisches Hochfrequenzfeld angelegt wird. Die Kräfte auf das Ion in diesem Hochfrequenzfeld speichern das Ion in radialer Richtung. Ein Herauslaufen aus der Falle in longitudinaler Richtung wird durch das Anlegen einer positiven Gleichspannung an den Enden der linearen Falle verhindert. Wenn die Bewegung des Ions durch Einstrahlen von geeignetem Laserlicht gekühlt wird, kann seine Position auf ca. 60 nm genau kontrolliert werden.

In dem Experiment aus Garching wurde nun das einzelne gespeicherte Ion in einem optischen Resonator platziert. Um ein Bedampfen der Spiegeloberflächen beim Laden der Falle aus einem Atomstrahl zu vermeiden, wird das Ion zunächst in einem ca. 25 mm entfernten Teil der Ionenfalle erzeugt und dann in den optischen Resonator transferiert (Abb. 1). Dieser besteht aus zwei hochreflektierenden Spiegeln, die sich im Abstand von 6 mm senkrecht zur Achse der linearen Falle gegenüberstehen. In diesem Resonator bilden sich stehende Lichtwellen, wenn Laserlicht längs seiner Achse eingekoppelt wird. Im vorgestellten Experiment wurde dazu eine Wellenlänge von 397 nm

verwendet. Dies entspricht einem Resonanzübergang des Ca^+ -Ions. Das Licht diente gleichzeitig zur Ionenkühlung. Wenn das Ion ein Photon aus diesem Lichtfeld absorbiert, wird dieses Photon kurze Zeit darauf wieder emittiert und kann detektiert werden. Da für schwache Lichtintensitäten die Absorptionswahrscheinlichkeit proportional der Intensität ist, ist der Betrag der Fluoreszenz ein Maß für die Intensität des Lichtfeldes.

Durch Verändern der Position des Ions im optischen Resonator lässt sich nun die Struktur des Lichtfeldes ausmessen. Dies geschieht in Richtung der Käfigachse

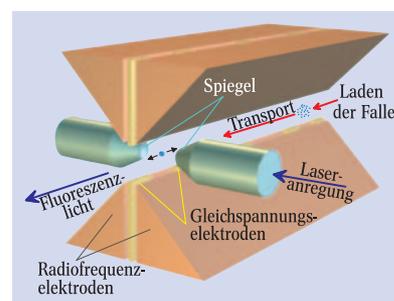


Abb. 1: Lineare Ionenfalle mit optischem Resonator. An vier stabförmigen Elektroden wird eine hochfrequente (300 MHz) Wechselspannung zur Ionenspeicherung in radialer Richtung angelegt. In axialer Richtung werden die Ionen durch eine positive Gleichspannung an den Enden der Falle gespeichert. Die Spiegel des optischen Resonators haben einen Abstand von 6 mm. Der ganze Resonator kann durch Piezoelemente in verschiedene Richtungen verschoben werden. Auf diese Weise wird das Ion als Sonde relativ zu den Resonatormoden bewegt. Das Fluoreszenzlicht gibt Aufschluss über die Intensitätsverteilung.

durch Änderung der longitudinalen Speicherspannung. In den Richtungen senkrecht zur Käfigachse wird der optische Resonator durch Piezoelemente verschoben.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für eine solche Messung in der Richtung senkrecht zur Achse des Resonators und der Falle, in der verschiedene Resonatormoden sichtbar werden. Solche Messungen waren bisher mit einer Auflösung von ca. 100 nm möglich, indem ein einzelnes Molekül auf ein Substrat aufgebracht und in das optische Feld eingeführt wurde. Das Molekül dient dabei als Sonde. Das Substrat kann jedoch Licht streuen, beugen oder absorbieren und dadurch die zu beobachtenden Felder stören. Ein einzelnes Ion, wie es in diesem Experiment verwendet wird, ist die kleinste denkbare Probe und führt zu einer störungsfreien Vermessung des Lichtfeldes. Die bisher erreichte räumliche Auflösung von 60 nm lässt sich weiter steigern, indem das Ion einerseits durch stär-