

Garching, 09.05.2011

Presse-Information

„Mikrowellen-Leiter“ für Elektronen

Wissenschaftler am MPQ wenden erstmals das Prinzip der Paul-Falle auf Elektronen an.

Die Untersuchung der Eigenschaften von Elektronen spielt eine Schlüsselrolle für das Verständnis der Naturgesetze. Die extrem leichten und flinken Teilchen sind aber nur schwer unter Kontrolle zu bringen. Mitarbeiter der Forschungsgruppe „Ultraschnelle Quantenoptik“ um Dr. Peter Hommelhoff am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching bei München) haben jetzt mikrostrukturierte Chips entwickelt, auf denen sich langsame Elektronen erstmals durch rein elektrische Wechselfelder führen lassen – wie Lichtwellen in einer Glasfaser (Phys. Rev. Lett., Online-Ausgabe, 9. Mai 2011). Die neue Technik verspricht ein breites Anwendungspotential, von der Durchführung fundamentaler Quantenexperimente bis hin zur nichtinvasiven Elektronenmikroskopie.

Elektronen haben der Formulierung der Quantenmechanik einen entscheidenden Impuls gegeben. Denn an ihnen manifestierte sich erstmals experimentell der bereits von Louis de Broglie vorausgesagte Wellencharakter elementarer Teilchen. Auch heute noch lässt sich aus ihrem Verhalten viel über die fundamentalen Gesetze der Natur lernen. Entsprechende Messungen werden bisher vor allem in sogenannten Penning-Fallen durchgeführt, bei denen eine Kombination von elektrischen und magnetischen Feldern die Elektronen in geordnete Bahnen zu lenken vermag.

Für eine Reihe von Experimenten mit propagierenden Elektronenstrahlen, wie zum Beispiel der Interferenz von langsamen Elektronen, wäre es von Vorteil, auf den Einsatz magnetischer Felder zu verzichten und die Elektronen mit rein elektrischen Wechselfeldern zu führen, sowie es seit Jahrzehnten für den Einfang elektrisch geladener Atome (Ionen) üblich ist. Die hier verwendeten sogenannten Paul-Fallen basieren auf vier Elektroden, an denen eine elektrische Wechselspannung anliegt, die mit Radiofrequenzen schwingt. Netto ergibt sich dabei eine rückstellende Kraft, welche die Teilchen im Zentrum der Falle festhält. Für die Erfindung dieser Methode, geladene Teilchen zu fangen, erhielt Wolfgang Paul 1989 den Nobelpreis für Physik.

Seit einigen Jahren greifen Forscher zur Realisierung von Paul-Fallen auch auf die für herkömmliche Mikroelektronik entwickelte Chiptechnik zurück und realisieren solche Ionenfallen erfolgreich mit mikrostrukturierten Elektroden auf flachen Substraten. Die Gruppe von Dr. Hommelhoff wendet diese Technik nun erstmals auf Elektronen an. Dabei ist aber zu beachten, dass die Elektronen ungefähr 10000mal leichter als Ionen sind und damit viel schneller auf elektrische Felder reagieren als die vergleichsweise schweren und trägen Ionen. Die Frequenz, mit der die Spannung an den Elektroden umgepolt wird, muss daher für das Fangen von Elektronen viel größer als beim Einschluß von Ionen sein und liegt im Mikrowellenbereich bei einigen Gigahertz.

In ihrem Experiment verwenden die Garchinger Physiker Elektronen aus einer thermischen Elektronenquelle, bei der ein Wolframdraht wie in einer Glühbirne geheizt wird und die austretenden Elektronen zu einem parallelen Strahl mit ei-

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit,
Dr. Olivia Meyer-Streng

Tel.: +49(0)8932 905-213
E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de

Hans-Kopfermann-Str. 1
D-85748 Garching

Tel.: +49(0)8932 905-0
Fax: +49(0)8932 905-200

ner Energie von einigen Elektronenvolt gebündelt werden (siehe Abb. 1). Von dort werden die Elektronen in den „Wellenleiter“ eingekoppelt. Das ist eine Struktur aus fünf auf einem flachen Substrat gefertigten, parallel verlaufenden Elektroden, an denen eine Wechselspannung mit einer Frequenz von etwa einem Gigahertz anliegt. In einer Entfernung von einem halben Millimeter über den Elektroden entsteht dadurch ein oszillierendes Quadrupolfeld, das Elektronen im Zentrum des Feldes in radialer Richtung, also quer zu den Elektroden, einschließt. In longitudinaler Richtung, parallel zu den Elektroden, wirkt dagegen keine Kraft auf die Teilchen, so dass sich diese frei entlang des „Leiters“ bewegen können. Insgesamt werden die Elektronen dadurch gezwungen, dem Verlauf der Elektroden auf dem Substrat zu folgen. Der Einschluss in radialer Richtung ist dabei außerordentlich stark, so dass die Elektronen selbst kleinräumigen Richtungsänderungen folgen.



Abb. 1: Leiterelektroden mit Elektronenquelle im Hintergrund; die weißen Linien dazwischen sind das darunterliegende Substrat. Die Elektronen werden durch ein winziges Loch im Zentrum der Quelle, welches einen Durchmesser von $20\mu\text{m}$ hat und auf dem Bild nicht zu erkennen ist, emittiert. Sie werden anschließend in einer Höhe von einem halben Millimeter über den Elektroden geführt und entlang der gebogenen Elektrodenstruktur im Vordergrund nach links abgelenkt.

Um den Effekt der Elektronenführung besser demonstrieren zu können, haben die Elektroden die Form eines 37 Millimeter langen Ausschnitts aus einem Kreisbogen (mit einem Radius von 40 Millimetern). Am Ende der Struktur befindet sich ein Detektor zum Nachweis der austretenden Elektronen. Wie in Abb. 2 (b) zu sehen ist, erscheint bei eingeschaltetem Wechselfeld auf dem Detektor deutlich ein hell leuchtender Fleck in der linken Bildhälfte, genau dort, wo sich der Ausgang des Leiters befindet. Wird das Feld abgeschaltet, laufen die Elektronen von der Quelle aus geradlinig weiter und in der rechten Bildhälfte ist dann ein aufgrund der Divergenz des Elektronenstrahls diffus erhelltes Gebiet sichtbar, siehe Abb. 2 (c).

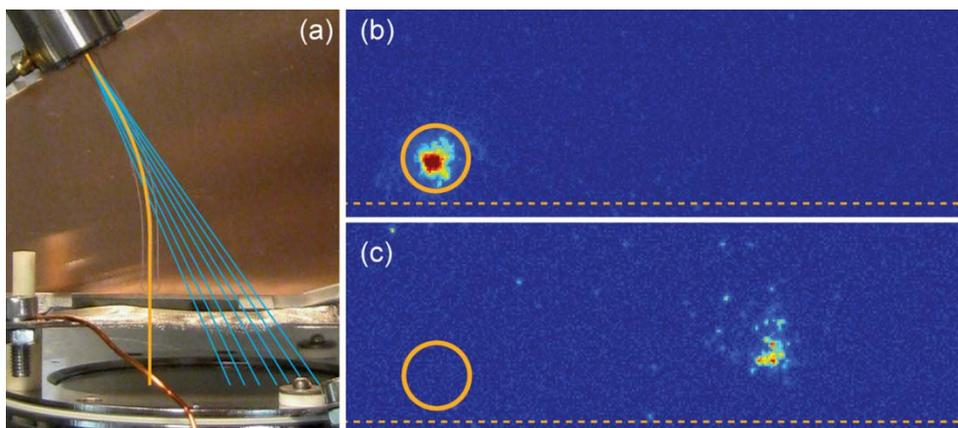


Abb. 2: Übersicht über den experimentellen Aufbau und Signale von geführten und nicht geführten Elektronen. (a) Ansicht des Aufbaus von oben mit dem Substrat im Zentrum. In der oberen linken Bild-ecke ist das letzte Element der Elektronenquelle zu erkennen. Geführte Elektronen folgen der orange-farbenen Linie von der Quelle zum Detektor, während die ungeführten Elektronen geradlinig über das Substrat fliegen (angedeutet durch blaue Linien). (b) Die geführten Elektronen liefern als Detektorsignal einen hellen runden Fleck am Ausgang des Elektronenleiters (mit einem Kreis markiert). (c) Bei abgeschalteter Mikrowellenanregung landen die Elektronen auf der rechten Detektorseite, wo ein schwächeres und aufgrund der Divergenz des Strahls etwas diffuseres Signal erscheint.

„Uns ist mit diesem Grundlagenexperiment der Nachweis gelungen, dass Elektronen mit rein elektrischen Feldern geführt werden können“, meint Dr. Hommelhoff. „Allerdings liefert die derzeit verwendete Elektronenquelle nur einen schlecht gebündelten Strahl, weshalb Elektronen verloren gehen.“ In Zukunft wollen die Wissenschaftler deshalb den neuartigen Wellenleiter mit einer Elektronenquelle kombinieren, die auf der Feldemission von atomar scharfen Metallspitzen beruht. Hier gelingt es bereits, den Elektronenstrahl so scharf zu bündeln, dass seine transversale Komponente nur durch die Heisenbergsche Unschärferelation begrenzt ist.

Damit ließen sich unter Umständen gezielt einzelne quantenmechanische Schwingungszustände der Elektronen im radialen Potential des Leiters bevölkern. „Der jetzt demonstrierte starke Einschluss der Elektronen bedeutet auch, dass ein „Quantensprung“ von einem Schwingungszustand in den nächsthöheren eine große Energieänderung erfordern würde und damit relativ unwahrscheinlich wäre“, erklärt Johannes Hoffrogge, Doktorand am Experiment. „Ein einmal präparierter Quantenzustand bliebe dadurch lange stabil erhalten und kann gut für Experimente genutzt werden“. Unter diesen Bedingungen ließen sich Quantenexperimente durchführen, beispielsweise Elektroneninterferometrie mit geführten Elektronen: hier wird die Wellenfunktion eines Elektrons erst gespalten und dann wieder zusammengeführt, so dass charakteristische Überlagerungen aus mehreren Quantenzuständen eines Elektrons erzeugt werden. Aber es sind auch praktische Anwendungen denkbar, etwa eine neue Art der Elektronenmikroskopie. [OM/JH]

Originalveröffentlichung:

J. Hoffrogge, R. Fröhlich, M. A. Kasevich, and P. Hommelhoff

“Microwave Guiding of Electrons on a Chip”

Phys. Rev. Lett., Online-Ausgabe, 9. Mai 2011

Kontakt:

Dr. Peter Hommelhoff

Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Hans-Kopfermann-Straße 1

85748 Garching

Tel.: +49 89 32905 265

E-Mail: peter.hommelhoff@mpq.mpg.de