

## Transistoren aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen

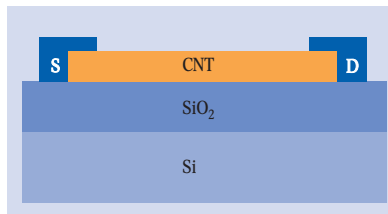
Kohlenstoff-Nanoröhrchen gehören sicherlich zu den Lieblingskindern der heutigen Materialforschung: nahtlose Rohre aus graphitartigem Kohlenstoff, 1 Nanometer im Durchmesser, bis zu mehreren Mikrometern oder gar Millimetern lang, je nach Durchmesser und Rollwinkel halbleitend oder metallisch, und wenn halbleitend dann mit Energielücken von einigen Zehntel Millielektronenvolt, für 1000 €/g bei verschiedenen Spin-off-Firmen zu kaufen, verhältnismäßig leicht im Labor herzustellen ... Sie sind zudem Weltrekordhalter in der Zugfestigkeit und leiten außerordentlich gut Wärme. Wegen ihres insgesamt kleinen Volumens kommt es zu Einzelelektroneneffekten (Quantenpunkte), wegen ihres geringen Durchmessers zu ballistischem Transport (Quantendrähte). Kaum eine Universitätsstadt, in der es nicht schon einen Kolloquiumsvortrag zu diesem Thema gab.

Die Nanotubes wurden vor etwa zehn Jahren entdeckt [1], und wenn es halbleitende Nanotubes gibt, so liegt der Gedanke nahe, Nanotransistoren daraus zu bauen. Dies ist als erstes der Gruppe um Cees Dekker in Delft gelungen [2], und bis heute haben mehr als ein Dutzend Teams über verschiedene Arten solcher Transistoren berichtet. Nun ist es gelungen, einen Nanotransistor herzustellen, dessen Widerstand nicht viel größer ist als der Mindestwiderstand für ballistischen Transport [3].

Von ballistischem Transport spricht man, wenn sich Elektronen wie Kanonenkugeln im Vakuum bewegen: reibungslos, verlustfrei. In eindimensionalen Leitern sollte dies der Fall sein, weil es hier nur wenig Möglichkeiten für Streuungen an Gitterschwingungen gibt. Und perfekte Nanoröhrchen sind (fast) eindimensional! Obwohl der Strom entlang der Röhrchen verlustfrei fließt, ist der Widerstand, von Zuleitung zu Zuleitung gemessen, nicht null. An der Schnittstelle von der dreidimensionalen Welt der Zuleitungen mit ohmschem Transport zur eindimensionalen Welt der Nanotubes mit ballistischem Transport bildet sich ein „Einströmwiderstand“ aus, der Quantenwiderstand  $R_Q = h/4e^2 = 6,5 \text{ k}\Omega$  (Die Nanotube verhält sich wie ein Wellenleiter

und lässt nur einzelne Moden passieren. Der Vorfaktor von  $R_Q$  hängt von der Zahl der verfügbaren Kanäle ab). In den meisten Experimenten liegt der Übergangswiderstand von Zuleitung zu Röhrchen jedoch im Bereich von Megaohm statt Kiloohm.

Abbildung 1 zeigt das Schema eines typischen Feldeffekt-Transistors auf der Basis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Auf einem Silizium-Chip wird ein halbleitendes Nanoröhrchen adsorbiert und mit zwei Metallstreifen kontaktiert (S: Source, D: Drain). Das Silizium ist stark dotiert und dient als Gate-Kontakt, eine isolierende  $\text{SiO}_2$ -Schicht trennt



**Abb. 1:** Schematischer Aufbau eines Feldeffekt-Transistors mit einem Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) als leitendem Kanal.

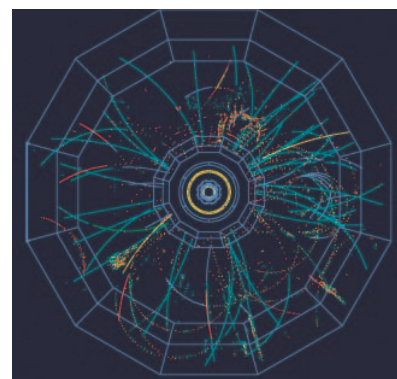
das Röhrchen vom Gate. Legt man nun eine Spannung (bias) zwischen Source und Drain an, so fließt ein Strom durch das Nanoröhrchen, der sich mit einer Spannung am Gate steuern lässt. Wie sich herausstellt, kann man so die Leitfähigkeit des Röhrchens um mehrere Größenordnungen modulieren.

In „nullter Näherung“ kann man sich die Wirkungsweise des Transistors so vorstellen: Wenn das Nanoröhrchen nicht dotiert ist, sollte es ein intrinsischer Halbleiter sein und bei tiefen Temperaturen einen hohen Widerstand aufweisen. Das halbleitende Röhrchen leitet aber, und zwar deswegen, weil die Austrittsarbeit von Kohlenstoff und Metallstreifen unterschiedlich ist und Elektronen vom Röhrchen zu den Metallelektroden fließen. Dadurch wird das Nanoröhrchen durch das benachbarte Metall gewissermaßen p-dotiert. Wenn man eine positive Spannung an das Gate legt, treibt das elektrische Feld die Löcher aus dem Röhrchen wieder heraus und die Leitfähigkeit nimmt ab.

Dies gilt aber, wenn überhaupt, nur in „nullter Näherung.“ Ausschlaggebend ist, was an den Übergangsstellen vom Kohlenstoff-Nanoröhrchen zu den Metallstreifen passiert. Hier liegt nicht nur die Schnittstelle von der dreidimensionalen zur eindimensionalen Welt, hier befindet sich auch ein Metall-Halbleiter-Übergang. Unabhängig von der Dimensionalität müssen sich hier Schottky-Barrieren ausbilden. Das heißt, das Abfließen der Elektronen durch unterschiedliche Austrittsarbeit sollte nur die Enden der Nanotubes betreffen, und die Energiebänder sollten sich entlang der Röhrchen verbiegen. Außerdem könnten die Nanotubes bereits durch die Herstellung p-leitend

## Auf dem Weg zum Quark-Gluon-Plasma

Bis wenige Mikrosekunden nach dem Urknall waren die Temperatur und die Energiedichte im Universum so hoch, dass sich Quarks und Gluonen frei bewegen konnten und nicht wie gewöhnlich im Inneren von Hadronen „eingesperrt“ waren. Nachdem das CERN bereits vor drei Jahren erste



Hinweise auf dieses Quark-Gluon-Plasma präsentiert hatte<sup>+</sup>, versuchen Physiker am Relativistic Heavy Ion Collider RHIC in den USA derzeit, den definitiven Nachweis zu führen. Dazu vergleichen sie die Ergebnisse von

hochenergetischen Stößen zwischen einem Gold-Ion und einem Deuteron (Abb.) mit denen zwischen zwei Gold-Ionen. Die Kollaborationen der vier RHIC-Detektoren fanden nun neue Indizien, die darauf hindeuten, dass bei den Au-Au-Stößen ein Quark-Gluon-Plasma entsteht.<sup>\*)</sup> So

ist es wohl nur noch eine Frage der Zeit, bis die letzten Zweifel an diesem außergewöhnlichen Zustand ausgeräumt sind.

<sup>+</sup>) vgl. Phys. Blätter, April 2000, S. 12

<sup>\*)</sup> Phys. Rev. Lett. **91**, 072302 bis 072305 (2003)

Dr. Sigmar Roth,  
Max-Planck-Institut  
für Festkörperphysik,  
Heisenbergstr. 1,  
70569 Stuttgart

sein, etwa durch Fehlstellen wie Carboxyl- oder Hydroxyl-Gruppen. Und schließlich kommt es auch auf das Benetzungsverhalten von Metall zu Röhrchen an und auf mögliche Verunreinigungen an der Grenzfläche.

Den Autoren von [2], Physikern aus Stanford und Perdue, ist es nun gelungen, Nanotubes so in Metalle einzubetten, dass sich keine oder nur ganz schwache Schottky-Barrieren ausbilden. Dazu haben sie nicht wie bisher üblich die Metalle Au, Ni, Pt oder Ti verwendet, sondern Palladium, welches die Röhrchen sehr gut benetzt, und dessen Austrittsarbeit sich durch *in situ*-Behandlungen mit Wasserstoff modifizieren lässt.

So können sie das Verhalten eines 300 nm langen Röhrchenstückes mit dem eines 3  $\mu\text{m}$  langen vergleichen. Im kurzen Röhrchen ist der Transport tatsächlich weitgehend ballistisch, während sich im langen Röhrchen Stöße mit Fehlstellen bemerkbar machen.

Das Fehlen der Schottky-Barriere ist für das Transistorverhalten sehr wichtig, denn die Barrieren begrenzen den Strom entlang der Röhre. Die Autoren erreichen in ihrer Vorrichtung ein Schaltverhältnis (on/off ratio) von  $10^6$  und Sättigungsströme von 25  $\mu\text{A}$  pro Röhrchen, was einer Stromdichte von  $10^9 \text{ A/cm}^2$  entspricht!

Die Arbeit ist nicht nur von Bedeutung für unser Verständnis von Quantendrähten und Nanotubes. Sie zeigt auch, dass in Kohlenstoff-Nanoröhrchen – infolge des ballistischen Transportes – sehr hohe Stromdichten zu erreichen sind. Schon lange bevor Nanoröhrchen als Transistoren praktisch eingesetzt werden, wird man sie als Leiterbahnen in integrierten Schaltungen verwenden. Durch die kovalenten chemischen Bindungen sind Nanotubes wesentlich stabiler als herkömmliche Metalle, sodass sich nicht so leicht kleine Partikel absondern, die am Chip herumwandern (Elektromigration) und zu Ausfällen der Bauelemente führen. Für diese „interconnects“ sind Stromdichten von über  $10^6 \text{ A/cm}^2$  erforderlich. Mehrere große Elektronikfirmen, darunter auch Infineon in München, arbeiten intensiv am Einsatz von Kohlenstoff-Nanoröhrchen in Silizium-Chips. Von besonderer Bedeutung werden die Nanoröhrchen für die kommenden Chipgenerationen sein, bei denen man die Bauele-

mente in mehreren Stockwerken übereinander anordnen wird, die man durch hochleitfähige Vias (vertikale interconnects) aufzugartig verbinden muss.

SIGMAR ROTH

- [1] S. Iijima, Nature **354**, 56 (1991)
- [2] S. J. Taus, A. Verschueren und C. Dekker, Nature **393**, 49 (1998)
- [3] A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom und H. Dai, Nature **424**, 654 (2003)

## ■ Brownsche Motoren: gemeinsam stark

***Brownsche Motoren erzeugen Kraft, indem sie thermische Fluktuationen gleichrichten. Da Kollisionen mit umgebenden Molekülen die Motoren nicht behindern, sondern ihnen vielmehr bei der Arbeit helfen, können diese auf extrem kleinen Größenskalen arbeiten. Diese Stärke Brownscher Motoren ist zugleich ihre Schwäche: Ein einzelner Motor kann nämlich auch nur mikroskopische Mengen Arbeit verrichten. Zum ersten Mal ist es jetzt gelungen, durch die gemeinsame Wirkung einer großen Zahl Brownscher Motoren ein makroskopisches Objekt in Bewegung zu setzen.***

Im Inneren von biologischen Zellen vollbringen so genannte molekulare Motoren Erstaunliches. Die Aufgabe des Motorproteins Kinesin ist es beispielsweise, eine gefüllte Membranblase (ein Vesikel) entlang eines Filamentes zu transportieren. Typischerweise geschieht das mit einer Geschwindigkeit von etwa  $0,1 \mu\text{m/s}$ , und mit einer Energieeffizienz, die Autohersteller erblassen lassen würde. Besonders bemerkenswert dabei ist, dass umgebende Wassermoleküle ständig mit Motor und Ladung kollidieren. Die pro Zusammenstoß auf die Ladung übertragene kinetische Energie entspricht augenblicklichen Geschwindigkeiten von mehreren  $\text{cm/s}$ . Dies entspräche einem Lkw auf der Landstraße, der von Windböen mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit hin- und hergeworfen wird.

Wie kann eine mikroskopisch kleine Maschine auch unter dem Einfluss von so überwältigend starkem Rauschen vergleichsweise effektiv arbeiten? Als Lösungen dieses Problems bieten sich Mechanismen der Krafterzeugung an, die den Einfluss thermischen Rauschens nicht bekämpfen, sondern