

Atomare Elektronik: Mit einzelnen Atomen elektrische Ströme schalten

Thomas Schimmel, Fangqing Xie, Christian Obermair,
Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe

Während sich in der konventionellen Mikroelektronik zunehmend Grenzen der Miniaturisierung abzeichnen, wird in der Forschung weltweit längst an neuartigen Konzepten gearbeitet. Dabei wird auch über kleinste elektronische Bauelemente auf der Basis einzelner Moleküle oder Atome nachgedacht. Während diese von verschiedenen Arbeitsgruppen als elektrische Leiter und Widerstände eingesetzt werden konnten, fehlte bislang auf der atomaren Skala jeglicher Ansatz für aktive Bauelemente wie Transistoren.

Mit einem neuartigen Verfahren ist es in der Gruppe von Prof. Thomas Schimmel in Karlsruhe erstmals gelungen, elektronische Schaltelemente auf atomarer Skala zu realisieren [1,2]. Durch das gezielte Umlagern eines einzigen Silber-Atoms in einem winzigen metallischen Kontakt lässt sich ein elektrischer Stromkreis kontrolliert öffnen und schließen. Solche atomaren Relais bzw. Einzelatom-Transistoren werden durch ein elektrisches Kontroll-Potential gesteuert, das an eine unabhängige dritte Elektrode, die Gate-Elektrode, angelegt wird. Die Bauelemente funktionieren reproduzierbar bei Raumtemperatur und eröffnen faszinierende Perspektiven für die Quantenelektronik und für atomare Logik-Schaltungen.

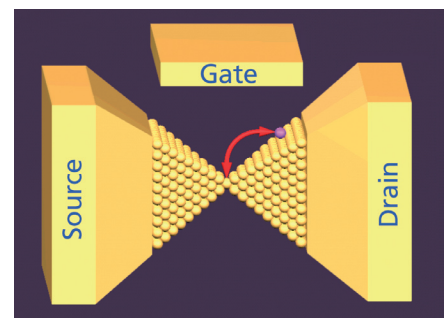
1 Motivation

Unsere gesamte Computer- und Informationstechnologie beruht letztlich auf

der einfachen Fähigkeit, einen Strom von A nach B durch eine Spannung an einer unabhängigen dritten Elektrode C schalten zu können. Die Verfügbarkeit eines entsprechenden Bauteils, eines Transistors, ist die hinreichende Voraussetzung zum Aufbau beliebig komplizierter logischer Schaltungen in der heute üblichen Digitalelektronik bis hin zu den Prozessoren in Computern.

2 Das Konzept eines atomaren Schaltelementes

Die Grundidee bei der Realisierung des atomaren Schalters ist in **Bild 1** gezeigt. Auf einem Träger beispielsweise aus Glas oder Silizium werden zwei winzige Goldelektroden aufgebracht, zwischen denen sich eine ca. 50 - 100 nm breite Lücke befindet. Eine solche Struktur lässt sich noch mühelos mit konventionellen Methoden herstellen.



Nun wird an den sich gegenüberstehenden Enden der Goldelektroden aus einem Elektrolyten galvanisch Silber abgeschieden, bis sich die beiden Silberkontakte an einem Atom berühren. Gelingt es nun, dieses kontaktierende Atom gezielt zwischen zwei definierten Positionen hin- und herzuschalten, so lässt sich der Stromkreis mithilfe dieses atomaren Relais gezielt öffnen und schließen.

Voraussetzung für die zuverlässige Funktion eines solchen atomaren Relais ist die Herstellung einer atomaren Bistabilität. Das kontaktierende Atom muss zwei stabile Positionen kennen: eine, bei der der Stromkreis geöffnet ist, und eine, bei der er geschlossen ist. Zur gezielten Herstellung einer solchen Bistabilität wurde in Karlsruhe ein spezielles elektrochemisches Zyklisierungsverfahren entwickelt. Ist der bistabile atomare Kontakt erst einmal hergestellt, so genügt eine kleine

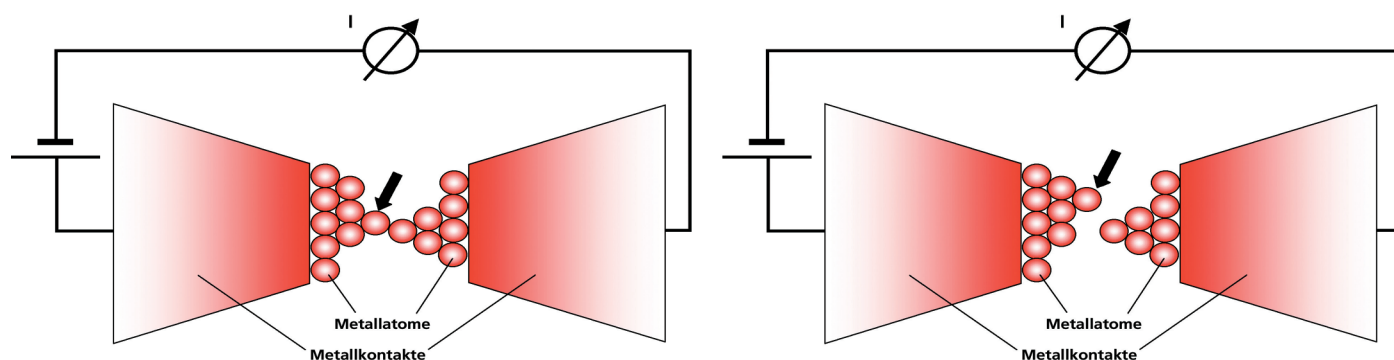


Bild 1: Funktionsprinzip des atomaren Schalters, der bei Raumtemperatur realisiert werden konnte: Durch das Umklappen der Position eines einzelnen Metall-Atoms wird ein elektrischer Stromkreis geschlossen (links) und geöffnet (rechts). Beim Einzelatom-Transistor wird die Position dieses Atoms über die Spannung an einer unabhängigen dritten Elektrode kontrolliert

Potentialänderung an einer benachbarten, separaten Kontroll-Elektrode, der sog. "Gate"-Elektrode, um den Kontakt zwischen beiden Positionen hin- und her zu schalten. Mit dem Gate-Potential lässt sich also der Stromkreis zwischen den beiden Kontakten "Source" und "Drain" gezielt öffnen und schließen. Damit ist erstmals die Funktion eines Transistors auf atomarer Skala realisiert.

3 Atomare Transistoren als quantenelektronische Bauelemente

Ein wesentlicher Aspekt eines derartigen Einzelatom-Transistors ist, dass der Leitwert zwischen Source und Drain im eingeschalteten Zustand keine beliebigen Werte annimmt, sondern durch die Gesetze der Quantenmechanik präzise festgelegt ist. Er beträgt $G_0 = 2e^2/h$, wobei e die Elementarladung und h das Planck'sche Wirkungsquantum ist. Es handelt sich beim atomaren Transistor also um ein quantenelektronisches Bauelement bei Raumtemperatur. **Bild 2** illustriert diese Funktion. Während das obere Diagramm (blau) jeweils das an die Gate-Elektrode angelegte Kontroll-Potential U_G als Funktion der Zeit darstellt, zeigt das untere Diagramm (rot) jeweils den entsprechenden Verlauf des Source-Drain-Leitwertes σ_{SD} . Das Zyklisierungsverfahren erlaubt es auch, gezielt atomare Transistoren mit vorherbe-

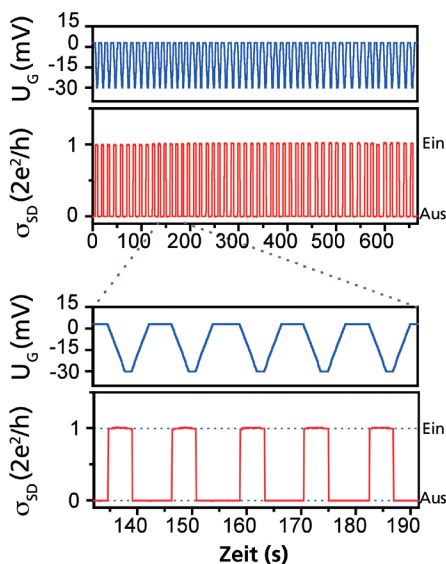


Bild 2: Messkurven am Einzelatom-Transistor im Betrieb bei Raumtemperatur: Während das obere Diagramm (blau) jeweils das an die Gate-Elektrode angelegte Kontroll-Potential U_G als Funktion der Zeit darstellt, zeigt das untere Diagramm (rot) jeweils den entsprechenden Verlauf des Source-Drain-Leitwertes σ_{SD}

stimmten höheren Leitwerten herzustellen. Auch hier handelt es sich um quantenelektronische Bauelemente, deren Leitwert im geschlossenen Zustand jeweils ein ganzzahliges Vielfaches des Leitwertquantums $G_0 = 2e^2/h$ beträgt. **Bild 3** zeigt ein Beispiel für $3 G_0$ als Leitwert im eingeschalteten Zustand. Hier ist auch die zusätzliche Möglichkeit der Informationsspeicherung gezeigt. Legt man das Potential U_G an der Gate-Elektrode auf einen Zwischenwert ("Hold"-Potential, s. Pfeile in Bild 3 oben), so verbleibt der atomare Schalter in dem Zustand, in dem er sich gerade befindet.

4 Perspektiven

Obwohl es sich hier noch um eine sehr neue Entwicklung handelt, lassen sich schon jetzt einige grundsätzliche Vorteile quantenelektronischer Systeme auf Basis atomarer Transistoren identifizieren:

- Da die kontaktierenden Atome die einzigen beweglichen Teile sind, öffnen sich Perspektiven für logische Bauelemente bei ultrahohen Frequenzen, die fundamental erst bei Frequenzen im THz-Bereich begrenzt sind – Frequenzen, wie sie mit konventionellen Ansätzen nicht erzielbar sind.
- Da es sich erstmalig um Ganzmetall-Transistoren ohne Bandlücke handelt, bei denen das Schalten auf einem völlig anderen Prinzip als bei konventionellen Halbleiter-Transistoren beruht, ist ein Schalten und damit die Durchführung logischer Operationen bereits mit Spannungen im Millivolt-Bereich möglich, was – zusammen mit der geringen Kapazität des Bauteils durch die kleinen Abmessungen – erlaubt, den Energieverbrauch je logischer Operation um mehrere Größenordnungen abzusenken.
- Da es sich um echte Quantenbauelemente handelt, sind die Leitwerte für die logische „Null“ und „Eins“ eindeutig festgelegt. Die Gefahr unerwünschter Zwischenwerte wird aufgrund der Quantisierung grundsätzlich vermieden.
- Entscheidend für eine mögliche technische Anwendbarkeit ist die Schnittstelle zwischen atomarer Elektronik einerseits und der „Makrowelt“ konventioneller Elektronik andererseits. Hier hat man den Vorteil, dass bereits ein einziges Leitwertquantum einen Wert von $G_0 = 2e^2/h = 1/(12,9 \text{ k}\Omega)$ besitzt. Dies bedeutet, dass man mit dem Strom durch ein einzelnes Transistor-Atom mühelos einen Leistungs-Operationsverstärker ansteuern und damit z.B. elektrische Geräte, Lampen etc. schalten kann.

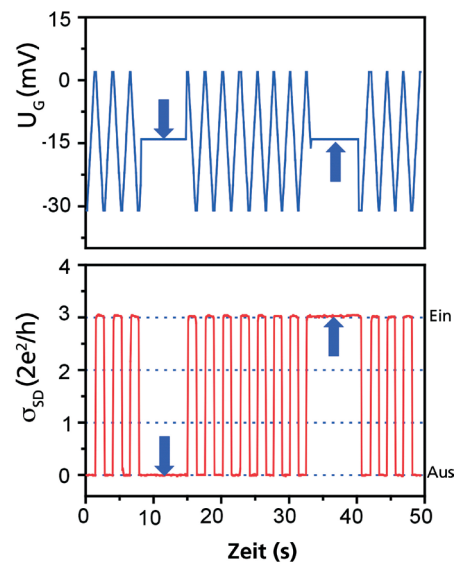


Bild 3: Messkurve für einen atomaren Quantenschalter mit $3 G_0$ als Leitwert im eingeschalteten Zustand. Hier ist auch die zusätzliche Möglichkeit gezeigt, mit dem atomaren Schalter Information zu speichern. Legt man das Potential U_G auf einen Zwischenwert ("Hold"-Potential, s. Pfeile im oberen Diagramm), so verbleibt der atomare Schalter in dem Zustand, in dem er sich gerade befindet (unteres Diagramm)

5 Zusammenfassung

Atomare Transistoren eröffnen als erste aktive elektronische Bauelemente auf atomarer Skala interessante Perspektiven für künftige Entwicklungen in Richtung atomarer Elektronik und maßgeschneiderter quantenelektronischer Systeme ("Quantum System Engineering") bei Raumtemperatur.

Literaturhinweise:

- [1] F.-Q. Xie, L. Nittler, Ch. Obermair, Th. Schimmel, Gate-controlled atomic quantum switch, Phys. Rev. Lett. 93, 128303 (2004)
- [2] Th. Schimmel, Ch. Obermair, F.-Q. Xie, Gate-kontrollierter atomarer Schalter, Deutsche Patentanmeldung, Aktenzeichen 10 2005 041 648.9, Internationale Patentanmeldung, Aktenzeichen PCT/DE 2005/001541

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Thomas Schimmel
 Forschungszentrum
 Karlsruhe – Institut für
 Nanotechnologie
 und
 Universität Karlsruhe
 Inst. für Angewandte Physik
 D-76128 Karlsruhe
 Tel. 0721/608-3570, Fax -8480
 thomas.schimmel@physik.uni-karlsruhe.de
 www.uni-karlsruhe.de/~agschimmel

