

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
16. März 2006 (16.03.2006)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2006/026961 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:  
G01N 27/414 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2005/001541

(22) Internationales Anmeldedatum:  
2. September 2005 (02.09.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2004 043 811.0  
8. September 2004 (08.09.2004) DE

KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA,  
MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,  
OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL,  
SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,  
VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,  
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,  
ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,  
TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,  
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,  
NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,  
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Erklärung gemäß Regel 4.17:**

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii) für alle Bestimmungsstaaten

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(71) Anmelder und

(72) Erfinder: SCHIMMEL, Thomas [DE/DE]; Engesserstrasse 3, 76131 Karlsruhe (DE). XIE, Fangqing [CN/DE]; Brohrainstr.3, 76131 Karlsruhe (DE). OBERMAIR, Christian [DE/DE]; Hauptstrasse 78, 76889 Kapsweyer (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,

(54) Title: GATE-CONTROLLED ATOMIC SWITCH

(54) Bezeichnung: GATE-KONTROLLIERTER ATOMARER SCHALTER

(57) Abstract: The invention relates to a method for producing a switch element. The invention is characterised in that the switch element comprises three electrodes that are located in an electrolyte, two of which (source electrode and drain electrode) are interconnected by a bridge consisting of one or more atoms that can be reversibly opened and closed. The opening and closing of said contact between the source and drain electrodes can be controlled by the potential that is applied to the third electrode (gate electrode). The switch element is produced by the repeated application of potential cycles between the gate electrode and the source or drain electrode. The potential is increased and reduced during the potential cycles until the conductance between the source and drain electrode can be switched back and forth between two conductances, as a result of said change in potential in the gate electrode, as a reproducible function of the voltage of the gate electrode.

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Herstellung eines Schaltelementes, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement drei Elektroden besitzt, die sich in einem Elektrolyten befinden und von denen zwei Elektroden („Source“ und „Drain“) miteinander durch eine reversibel Öffnbare und schließbare Brücke aus einem oder mehr Atomen miteinander verbunden sind und das Öffnen und Schließen dieses Kontaktes zwischen Source- und Drain-Elektrode über das an die dritte Elektrode („Gate-Elektrode“) angelegte Potential gesteuert werden kann, wobei die Herstellung des Schaltelementes durch wiederholtes Anlegen von Potentialzyklen zwischen der Gate-Elektrode und der Source- bzw. Drain-Elektrode erfolgt, wobei das Potential während der Potentialzyklen solange erhöht und wieder abgesenkt wird, bis sich aufgrund des Wechsels des Potentials an der Gate-Elektrode der Leitwert zwischen Source- und Drain-Elektrode reproduzierbar als Funktion der Spannung der Gate-Elektrode zwischen zwei Leitwerten hin- und herschalten lässt.

WO 2006/026961 A2

*„Gate-kontrollierter atomarer Schalter“***Beschreibung****Stand der Technik und zu lösende Problemstellung**

Die Entwicklung in der Mikroelektronik ist geprägt von einer zunehmenden Miniaturisierung. Neben einer Verkleinerung der Abmessungen einzelnen Bauelemente, insbesondere Transistoren und dem Übergang zu immer höheren Taktfrequenzen [1,2] steht zunehmend auch die Reduzierung des Energieverbrauchs je logischer Operation im Vordergrund. Bereits bei den in Produktion befindlichen Halbleiterstrukturen in Prozessoren und Speicherchips liegen gegenwärtig die Abmessungen der einzelnen Bauelemente auf einem Mikrochip unterhalb von 100 Nanometern mit dem Ziel weiterer Verkleinerung. Während sich die Halbleiter-Technologie noch weitgehend auf Silizium-basierte Systeme stützt, werden zunehmend auch alternative Systeme für die Nanoelektronik diskutiert, insbesondere den Aufbau logischer Elemente wie etwa Schalter und Transistoren, auf der Basis einzelner Moleküle (so genannte Molekulare Elektronik) [3,4,5].

Noch kaum diskutiert ist die Möglichkeit des Aufbaus elektronischer Schaltungen auf der Basis von Bauelementen, deren aktive Struktureinheiten nicht einzelne – teilweise sehr spezielle und z.T. komplexe – Molekülstrukturen sind, sondern einzelne Atome, etwa Metallatome („atomare Elektronik“). Während für die Molekulare Elektronik bereits eine Vielzahl von vorgeschlagenen Konzepten, aber auch von experimentellen Realisierungen existiert, gibt es noch kein Konzept für eine atomare Elektronik. Während passive Bauelemente wie Kondensatoren und Widerstände auf atomarer Skala längst als Prototypen realisiert und experimentell ausführlich untersucht sind, scheitert eine atomare Elektronik bisher an der Realisierung eines atomaren Transistors, d.h. eines Bauteils auf atomarer Skala, bei dem ein Source-Drain-Widerstand gezielt über eine unabhängige dritte Elektrode, die Gate-Elektrode, gesteuert und beispielsweise zwischen einem elektrisch leitfähigen On-State und einem geringer leitfähigen oder im Idealfall nichtleitenden Off-State gezielt über die Variation des an die Gate-Elektrode angelegten Potentials gesteuert werden kann.

Andererseits gibt es in der Literatur bereits umfangreiche Vorarbeiten zur Herstellung von Kontakten aus einzelnen Atomen [6,7,8,9,10,11,12]. Dies geschieht zum einen auf mechanischem Wege, indem man eine dünne metallische Brücke soweit auseinanderzieht, bis sie nur noch aus einem Kontaktbereich von einem oder wenigen Atomen im Durchmesser besteht. Dabei werden insbesondere mechanisch kontrollierbare Bruchkontakte (Mechanically Controllable Break Junctions, MCB) und der Kontakt zwischen der metallischen Spitze eines Rastertunnelmikroskopes und einer metallischen Probe verwendet, aber auch Kontakte in Relais u.a. wurden untersucht. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass sich metallische Punktkontakte auf atomarer Skala auch durch galvanische Abscheidung von Metallen aus einem Elektrolyten in einer kleinen Lücke („Gap“) zwischen zwei elektrisch leitenden Kontakten herstellen lassen [10,11,12]. Während sich solche Kontakte häufig, aber längst nicht immer als Quantenpunktkontakte mit Leitwerten von ganzzahligen Vielfachen des Leitwertquantums erweisen, lässt sich ihr Leitwert, den sie annehmen, kaum vorherbestimmen oder vorher auf einen bestimmten Wert gezielt einstellen. Vielmehr nimmt der Leitwert der metallischen Brücke mit abnehmendem Durchmesser – meist in mehreren Stufen – sukzessive ab, bis die Brücke bricht. Das wesentliche Problem für die Realisierung einer Atomaren bzw. Molekularen Elektronik, nämlich die Realisierung aktiver Bauelemente, die es erlauben, mittels einer unabhängigen dritten Steuerelektrode den Leitwert zwischen einer Source- und einer Drain-Elektrode gezielt zu steuern und einzustellen, ist damit jedoch noch nicht gelöst.

Es gab in der Vergangenheit zwei wesentliche Ansätze, das Problem zu lösen. Zum einen wurde ein atomarer Kontakt wiederholt geöffnet und geschlossen, indem man zwei makroskopische Elektroden aufeinander zu und voneinander wegbewegt hat [13]. Hier war zweifellos der Kontakt auf atomarer Skala, das Öffnen und Schließen des Kontaktes erforderte aber die Bewegung einer makroskopischen Elektrode.

In einem anderen Ansatz gelang es der Gruppe um Don Eigler [14], in einem Tunnelmikroskop gezielt die Position eines einzelnen Atoms zwischen zwei Positionen (an der Tunnelspitze bzw. auf der Probenoberfläche) hin und her zu schalten. Hier handelt es sich zweifellos um ein Bauteil, dessen einziges bewegliches bzw. bewegtes Teil ein einzelnes

Atom ist. Dieser „Atom-Flip-Flop“ hat jedoch nicht nur dem Nachteil, dass er in der gezeigten Konfiguration nur bei tiefen Temperaturen (typ. 4 K bis 30 K) und im Ultrahochvakuum betrieben werden kann, also nicht bei den Bedingungen, bei denen in der technischen Anwendung elektronische Schaltungen betrieben werden. Vielmehr ist hier auch keine unabhängige dritte Elektrode als Steuerelektrode oder Gate vorhanden. Die Umschaltung der Atom-Position des beweglichen Atoms geschieht vielmehr durch Anlegen von Potentialen an die beiden Elektroden, deren Leitwert umgeschaltet werden soll. Vor allem aber lässt sich mit dieser Anordnung ein elektrischer Stromkreis nicht öffnen und schließen, sondern der Widerstand des Kontaktes variiert allenfalls um typischerweise 0% bis 40% durch den Positionswechsel des Atoms, wobei dieser Prozentsatz an Änderung nicht exakt vorhersagbar ist.

Ein anderes atomares Schaltelement wurde von Fuchs und Schimmel [15,16] vorgestellt. Hier ist der Schaltprozess ebenfalls auf atomarer Skala. Im Gegensatz zu dem eben genannten Beispiel kann der Schaltvorgang auch unter Umgebungsbedingungen, d.h. bei Raumtemperatur und ohne die Notwendigkeit von Vakuum oder Sauerstoffausschluss, also beispielsweise an Luft ausgeführt werden. Jedoch handelt es sich hier primär um ein positionelles Schalten. Ein Umschalten eines elektrischen Tunnelstromes zwischen einem höheren und einem niedrigeren Wert ist ebenfalls nur unter Verwendung eines Tunnelmikroskopes beobachtbar. Ein Aus- und Einschalten des Tunnelstromes durch das atomare Bauelement ist nicht möglich.

### **Erläuterung des erfindungsgemäßen Verfahrens und Bauelementes**

Das erfindungsgemäße Verfahren löst nun dieses Problem, indem ein atomares Schaltelement entwickelt wurde, dessen einzige bewegliche Elemente die kontaktierenden Atome sind und dessen elektrischer Kontakt zwischen zwei Elektroden (Source und Drain genannt) über ein an einer unabhängigen dritten Elektrode angelegtes Potential (Kontrollpotential) gezielt geöffnet und geschlossen werden kann. Das Bauteil kann reproduzierbar bei Raumtemperatur und ohne Ausschluss von Sauerstoff betrieben werden. Das Verhältnis zwischen dem Source-

Drain-Leitwert in eingeschalteten und im ausgeschalteten Zustand kann mehr als 1000, je nach Ausführung mehr als 10000 betragen.

Die Grundidee bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist das „Trainieren“ eines elektrochemisch hergestellten atomaren Punktkontaktes durch wiederholtes Zyklisieren in folgender Weise.

Zunächst wird in einem kleinen Zwischenraum zwischen zwei Elektroden galvanisch aus einem Elektrolyten Metall abgeschieden, bis der Kontakt zwischen den beiden Elektroden geschlossen ist und ein voreingestellter oberer Leitwert X überschritten ist. Anschließend wird sofort oder mit definierter zeitlicher Verzögerung ein Auflösepotential  $V_2$  an die beiden Elektroden relativ zur Referenzelektrode angelegt (dies geschieht beispielsweise, aber nicht notwendigerweise dadurch, dass nicht das Potential der beiden Goldelektroden, sondern das Potential der Quasi-Referenz-Elektrode relativ zu einem Bezugspotential „Ground“ variiert wird), bis ein unterer Leitwert Y unterschritten wird, und anschließend wird wieder ein Abscheidopotential  $V_1$  angelegt, bis in dem Kontakt der obere Leitwert X erreicht ist und der Zyklus mit Anlegen des Auflösepentials  $V_2$  wieder neu beginnt.

Dies wird solange wiederholt, bis durch dieses „Training“ des Kontaktes als Antwort auf das Anlegen eines Auflösepentials an die Arbeitselektroden relativ zur Referenzelektrode (Arbeitselektrode positiver relativ zur Referenzelektrode) der Leitwert des Kontaktes mit oder ohne zeitliche Verzögerung auf den Wert null springt und auf Anlegen eines Abscheidopotentials (Arbeitselektrode negativer relativ zur Referenzelektrode) der Leitwert des Source-Drain-Kontaktes mit oder ohne zeitliche Verzögerung auf den beabsichtigten Wert  $G$  springt. Das beschriebene Verfahren arbeitet besonders vorteilhaft, wenn der beabsichtigte On-State-Leitwert  $G$  ein Vielfaches des Leitwertquantums beträgt.

Mittels eines Hold-Potentials, d.h. mit einem Wert des Potentials, der zwischen Abscheide- und Auflösepotential liegt, lässt sich ein angenommener Leitwert (On-State bzw. Off-State) anschließend stabil halten so lange, bis gezielt durch Potentialänderung umgeschaltet wird – über das Abscheidopotential von Off-State zu On-State bzw. über das Auflösepotential von On-State zu Off-State.

Auf diese Weise lässt sich die Funktion eines Transistors oder eines Relais auf atomarer Skala realisieren. Das Bauteil stellt einen atomaren Schalter bzw. ein atomares Relais dar, das sich als funktionelle Einheit für atomare Logikschaltungen und Logikchips sowie für atomare Elektroniken einsetzen lässt.

Über die Möglichkeit, nach Einstellen eines definierten On-State das Zyklisieren und das Schalten einzustellen und lediglich ein Hold-Potential (dessen Wert im Allgemeinen für das Halten des On-State und für das Halten des Off-State auch unterschiedlich sein kann, aber nicht muss, siehe untenstehende beispielhafte Ausführungsbeschreibung) anzulegen, lässt sich das Verfahren nicht nur zur Herstellung und zum Betrieb atomarer Schalter und atomarer Transistoren verwenden, sondern auch zur Herstellung von Widerständen mit vorselektierbarem, vor der Herstellung vorgebbarem definiertem Wert, der vorzugsweise ein ganzzahliges Vielfaches des Leitwertquantums sein kann.

Ein Ausführungsbeispiel für die genannten Anwendungen ist untenstehend beschrieben. Weitere Beispiele finden sich in Anhang 1, Anhang 2 und Anhang 3.

Die vorliegende Erfindung wird unter Bezugnahme auf die folgenden Beispiele näher erläutert, ohne auf diese beschränkt zu sein.

## **1 Apparativer Aufbau/Präparation**

### **1.1 Messaufbau**

Der zur elektrochemischen Abscheidung atomarer metallischer Kontakte verwendete Messaufbau ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Er besteht aus einer elektrochemischen Zelle, gefüllt mit einem Metallionen-haltigen Elektrolyten, und potentiostatisch kontrollierten Elektroden. Als Arbeitselektroden dienen zwei auf einem Glassubstrat fixierte Goldelektroden, die mit einem Abstand in der Größenordnung von 100 nm elektrisch voneinander isoliert sind. Beide Goldelektroden sind bis auf einen mikroskopischen Bereich um die Kontaktregion mit einem Polymer-Lack gegen den Elektrolyten isoliert.

Durch Anlegen eines elektrochemischen Potentialunterschieds zwischen den Arbeitselektroden und einer (Pseudo-)Referenzelektrode werden Metallinseln (hier im Beispiel Silberinseln) auf dem freiliegenden Bereich der Goldelektroden abgeschieden. Gleichzeitig wird die Leitfähigkeit zwischen beiden Arbeitselektroden erfasst. Dies erfolgt solange, bis sich zwei auf verschiedenen Goldelektroden aufgewachsenen Metallinseln berühren und die Lücke zwischen den beiden Goldelektroden elektrisch leitend schließen.

## **1.2 Elektrochemisches System zur Silberabscheidung**

Für die elektrochemische Abscheidung von atomaren Kontakten aus Silber wurde als Elektrolyt eine wässrige Silber-Nitratlösung (0,1 mM  $\text{AgNO}_3$  + 0,1 M  $\text{HNO}_3$ , gelöst in bidestilliertem Wasser) verwendet. Als (Pseudo-)Referenz- und Gegenelektrode werden jeweils Silberdrähte mit 0,25 mm Durchmesser (Reinheit 99,9985 %) verwendet.

## **1.3 Elektrochemische Abscheidung atomarer Silberkontakte**

Zur Abscheidung von Silber wird an die (Pseudo-)Referenzelektrode eine positive Kontrollspannung zwischen 2 mV und 40 mV angelegt. Dies entspricht einem Abscheidepotential zwischen -2 mV und -40 mV (jeweils vs.  $\text{Ag}/\text{Ag}^+$ ) an einer der beiden Arbeitselektroden (hier Goldelektrode (1) genannt). Die zweite Arbeitselektrode, Goldelektrode (2), befindet sich konstant auf einem im Vergleich zur Goldelektrode (1) um  $U_{\text{mess}}$  erniedrigten Potential.

Im diesem Beispiel wurde eine Messspannung  $U_{\text{mess}}$  von -12,9 mV verwendet. Dies bedeutet, dass sich die Goldelektrode (2) auf einem um 12,9 mV niedrigeren Abscheidepotential als die Goldelektrode (1) befand: Da die Goldelektrode (2) ein negativeres Abscheidepotential als die Elektrode (1) aufweist, scheidet sich auf ihr auch tendenziell mehr Silber ab.

Zur Erzeugung atomarer Kontakte wird nun durch Anlegen einer positiven Kontrollspannung - was dem Anlegen eines Abscheidepotentials an den Arbeitselektroden entspricht - solange Silber auf beiden Elektroden abgeschieden, bis sich zwei Silberinseln berühren und diese

Inseln die Goldelektroden leitend verbinden. Dies wird durch eine kontinuierliche Messung des Leitwerts zwischen den beiden Goldelektroden während der Abscheidung überprüft. Mit einem speziell entwickelten Computerprogramm ist es nun möglich, die Abscheidung bei einem vorgegebenen Leitwert zu stoppen bzw. den Kontakt durch Anlegen einer negativen Kontrollspannung - was dem Anlegen eines Auflösepentials an den Goldelektroden entspricht - wieder aufzulösen.

Auf diese Weise lassen sich elektrochemisch abgeschiedenen atomaren Silberpunktkontakte mit quantisierten Leitwerten herstellen. Die Messung erfolgte bei Raumtemperatur. Der Leitwert des atomaren Silberkontaktes betrug ca.  $1 G_0$ . Nachdem der Silberkontakt abgeschieden wurde, wurde die Kontrollspannung auf einen Wert von -29 mV erniedrigt. (Zur Verdeutlichung: Dies entspricht einem elektrochemischen Auflösepential von +29 mV vs.  $\text{Ag}/\text{Ag}^+$  der Goldelektrode (1) bzw. von  $(+29 \text{ mV} - 12,9 \text{ mV} = 16,1 \text{ mV})$  vs.  $\text{Ag}/\text{Ag}^+$  der Goldelektrode (2)). Als Folge des Auflösen des Kontaktes springt der Leitwert auf null.

Nach Erhöhen der Kontrollspannung auf +2 mV schied sich erneut Silber auf den Arbeitselektroden ab. Dies erfolgte solange, bis sich ein neuer Kontakt gebildet hatte und damit der Leitwert wieder auf einen Wert von  $1 G_0$  anstieg. Anschließend wurde die Abscheidung gestoppt. Die Abweichung des gemessenen Leitwerts von dem exakten Wert von  $G_0 = 2e^2/h$  betrug in diesem Fall weniger als 1 %.

## 2 Atomares Schalten

### 2.1 Gezieltes atomares Schalten

#### *„Trainieren“ von Kontaktkonfigurationen durch Zyklisieren*

Zur Erzeugung bistabiler Kontakte wird ein Verfahren verwendet, bei dem durch mehrmaliges zyklisches elektrochemisches Abscheiden und Auflösen ein atomarer Kontakt „trainiert“ wird, d. h. es werden solange verschiedene Kontaktkonfigurationen erzeugt, bis sich eine bistabile Konfiguration einstellt. Dazu wurde ein Computerprogramm entwickelt, mit dem die entsprechenden Parameter vorgewählt werden können und der zyklische Prozess automatisch durchlaufen wird.

Im Folgenden wird ein Beispiel der Erzeugung eines Schalters zwischen null und  $1 G_0$  beschrieben. Zunächst wurde ein atomarer Kontakt abgeschieden. Sobald der Leitwert eine obere Schwelle (hier  $0,94 G_0$ ) nahe dem gewünschten Leitwert für den „ein“-Zustand (On-state,  $1 G_0$ ) erreicht hatte, wurde die Abscheidung gestoppt und der folgende computergesteuerte Zyklus gestartet: Durch Anlegen einer auflösenden Kontrollspannung wurde der Kontakt aufgelöst bis der Leitwert unter eine untere Schranke (Off-State, hier  $0,05 G_0$ ) fiel. Anschließend wurde erneut eine abscheidende Kontrollspannung angelegt, bis der Leitwert den oberen Schwellwert überschritten hat. Danach wurde ein neuer Auflöse-/Abscheide-Zyklus gestartet, usw.

Während der ersten Auflöse-/Abscheide-Zyklen eines sich neu formenden Kontaktes treten oftmals Schwankungen des Leitwerts zwischen den verschiedenen Durchgängen auf. In der Regel findet im Laufe der Zeit spontan ein Übergang von unregelmäßigen Schwankungen des Leitwerts zu einem kontrollierten durch die Kontrollspannung gesteuerten Schalten zwischen zwei Niveaus (hier zwischen null und  $1 G_0$ ) statt.

### *Periodisches Schalten*

In Abb. 2 ist ein Beispiel für eine Abfolge von fünf Schaltvorgängen eines atomaren Schalters, der durch das gerade beschriebene Verfahren erzeugt wurde, dargestellt. Der atomare Silberkontakt schaltet zwischen einem „aus“-Zustand mit Leitwert null und einen „ein“-Zustand mit Leitwert  $1 G_0$ , gesteuert durch Anlegen einer externen elektrochemischen Kontrollspannung. Diese Kontrollspannung ist in Abhängigkeit von der Zeit in Abb. 2 (a) dargestellt, während Abb. 2 (b) den gleichzeitig gemessenen Leitwert wiedergibt. Jede Änderung in der Kontrollspannung wird gefolgt von einem Schalten des Leitwerts des atomaren Silberkontaktes.

Die einzelnen Schaltprozesse selbst erfolgen sehr reproduzierbar: Im Falle des in Abb. 2 dargestellten Schalters konnten mehr als 1000 durch die Kontrollspannung gesteuerte Schaltvorgänge zwischen den Leitwerten null und  $1 G_0$  beobachtet werden. Weiterhin konnten solche Schalter mit mehreren verschiedenen Kontakten reproduziert werden. Wertet

man die 1000 Schaltvorgänge aus, ergibt sich eine Wiederholungsgenauigkeit von 0,8 % (Standardabweichung) zwischen den Leitwerten, die bei den einzelnen Schaltvorgängen erreicht werden. Das Rauschen des quantisierten „ein“-Zustandes beträgt weniger als 0,4 %. Weiterhin konnte die Abweichung des mittleren gemessenen Leitwertes vom theoretisch vorhergesagten Wert von  $1 G_0$  zu lediglich 1,0 % bestimmt werden. Das Verhältnis der Leitwerte zwischen „ein“- und „aus“-Zustand wird dadurch begrenzt, dass der Leitwert des „aus“-Zustandes aufgrund elektrochemischer Leckströme nicht genau null beträgt. Abhängig von der individuellen Konfiguration des Kontaktes ergeben sich typischerweise Verhältnisse zwischen 1000 und mehr als 3000. Der eigentliche Schaltvorgang im Leitwert folgt nicht sofort der angelegten Kontrollspannung, sondern es verstreicht eine gewisse Zeitdauer zwischen Änderung der Kontrollspannung und der Auswirkung auf den Kontakt. Diese charakteristische Zeitdauer hängt von der Kontaktgeometrie und der Ionen-Konzentration des Elektrolyten ab und beträgt im hier verwendeten Aufbau einige Sekunden.

Die eigentliche Schaltzeit des Übergangs ist allerdings wesentlich kürzer, wie Abb. 3 zeigt: Dort ist die abfallende Flanke eines Schaltvorganges aus einer reproduzierbaren Abfolge von Übergängen zwischen den Leitwerten null und  $2 G_0$  mit einer Zeitauflösung im  $\mu\text{s}$ -Bereich dargestellt. Zunächst verläuft der Leitwert nahezu konstant bei etwa  $2 G_0$ . Der eigentliche Schaltvorgang beginnt mit einer etwa  $50 \mu\text{s}$  andauernden Vorphase ( $t_0$  in Abb. 3), in der der Leitwert langsam auf etwa  $1,7 G_0$  fällt, bevor der eigentliche Schaltvorgang ( $t_1$ ) stattfindet.

Für die Dauer des eigentlichen Schaltvorganges ( $t_1$  in Abb. 3) kann aufgrund einer zu geringen Zeitauflösung der Messelektronik lediglich eine obere Grenze von  $14 \mu\text{s}$  angegeben werden. In weiteren Experimenten mit verbesserter Elektronik konnten bereits Schaltprozesse mit Zeitdauern von  $\leq 3 \mu\text{s}$  beobachtet werden. Auch diese gemessene Zeitdauer ist noch durch eine zu geringe experimentelle Zeitauflösung begrenzt. Die eigentliche Schaltgeschwindigkeit sollte viel höher liegen, da – im Gegensatz zu anderen Verfahren – hier die einzigen beweglichen Teile des Schalters einzelne Atome sind und somit die physikalischen Grenzen der Schaltfrequenzen im Tera-Hertz-Bereich [17] liegen.

### *Gezieltes Ansteuern*

Mit der soeben vorgestellten Methode des „Trainierens“ einer atomaren Schaltkonfiguration lassen sich nicht nur Schalter mit Leitwerten zwischen null und  $1 G_0$  herstellen, sondern es ist auch möglich, Schaltvorgänge zwischen null und anderen frei wählbaren ganzzahligen Vielfachen von  $G_0$  zu erzeugen. Ein Ausschnitt eines so erzeugten Kontaktes, der zwischen null und  $2 G_0$  schaltete, wurde bereits in Abb. 3 dargestellt.

Ein weiteres Beispiel ist in Abb. 4. dargestellt: Entscheidend ist dabei die Wahl des oberen Schwellenleitwertes beim zyklischen elektrochemischen Abscheiden und Auflösen des Kontaktes. Will man z. B. einen Schalter zwischen null und  $3 G_0$  erzeugen, so wählt man einen oberen Schwellwert von fast  $3 G_0$ . Als Folge des Trainingsprozesses bildet sich ein Kontakt, dessen Leitwert durch eine äußere Kontrollspannung zwischen null und  $3 G_0$  schaltbar ist (siehe Abb. 4). Die Signalform mit der die Kontrollspannung in Abhängigkeit von der Zeit angelegt wird (hier dreiecksförmig) hat keinen Einfluss auf den Schaltvorgang des Leitwertes, der digital zwischen zwei Werten verläuft.

In Abb. 4 wird weiterhin die Möglichkeit demonstriert, den periodischen Schaltprozess zu unterbrechen und ein bestimmtes Leitwertniveau konstant bei zu behalten. Dazu wird eine Halte-Kontrollspannung (hier  $-14 \text{ mV}$ ) angelegt, die so gewählt wurde, dass sich am Kontakt ein lokales elektrochemisches Gleichgewichtspotential einstellte. Diese bewirkte, dass lokal keine weitere elektrochemische Abscheidung von Atomen oder Auflösung des atomaren Kontaktes stattfand und somit der Leitwert als Funktion der Zeit konstant blieb. In Abb. 4 ist dieses Verhalten sowohl für den „aus“-Zustand (linker Pfeil) als auch für den „ein“-Zustand (rechter Pfeil) zu erkennen. Der atomare Schalter kann somit, gesteuert durch die Kontrollspannung, in drei verschiedenen Modi betrieben werden: Einschalten des Stromes, Ausschalten und Halten des zuletzt eingenommenen Zustandes. Ein solcher Schalter bildet somit die Basis für logische Schaltelemente auf atomarer Skala.

## 2.2 Zusammenfassung der Experimente zum bistabilen Schalten

Im Rahmen der gegebenen Beispiele wurde ein Verfahren vorgestellt, das es erlaubt, durch zyklisches elektrochemisches Abscheiden und Auflösen zwischen zwei Schwellenwerten, einen bistabilen atomaren Schalter herzustellen. Diese stellen die ersten atomaren Schalter dar, die durch eine externe Steuerelektrode kontrolliert werden und bei denen die einzigen sich bewegenden Elemente einzelne Atome sind.

### Abbildungsverzeichnis

*Abb. 1 (a) gibt eine Illustration des Grundprinzips des auf einem metallischen Quantenpunktkontakt basierenden Schaltens auf atomarer Skala wieder. Die kontaktierenden Atome werden durch eine extern angelegte Gate-Spannung hin und her bewegt, was zu einem durch die Gate-Spannung kontrollierten Öffnen und Schließen des Kontakts auf atomarer Skala führt. (b) gibt eine schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus wieder. Durch Anlegen eines elektrochemischen Abscheidopotentials, gesteuert über die Gate-Spannung, wird in diesem Beispiel Silber in die nanoskalige Lücke zwischen den Goldelektroden („Source“ und „Drain“) elektrochemisch abgeschieden, während gleichzeitig die Leitfähigkeit zwischen den Goldelektroden mit einer Messspannung von typischerweise 12,9 mV gemessen wird. Durch wiederholtes Computer-kontrolliertes elektrochemisches Zyklisieren wird ein bistabiler Schalter auf atomarer Skala hergestellt.*

*Abb. 2: Schalten des Leitwerts, gesteuert durch eine Kontrollspannung  $U_{\text{Kontroll}}$ : Durch Variation der Kontrollspannung (a) wird der Leitwert des atomaren Silberkontakts (b) zwischen einem nicht leitenden „aus“-Zustand und einem „ein“-Zustand mit einem quantisierten Leitwert von  $1 G_0$  geschaltet. Die Kurven stellen die ungefilterte Messdaten dar und zeigen einen scharfen Übergang zwischen den zwei Zuständen. Das Experiment demonstriert einen atomaren Schalter, der extern durch eine Kontrollspannung gesteuert wird.*

**Abb. 3:** Zeitabhängigkeit des Schaltprozesses: Dargestellt ist die abfallende Flanke des Leitwerts in Abhängigkeit von der Zeit bei Auflösen eines atomaren Silberkontaktes. Der Ausschnitt ist Teil einer längeren Abfolge von periodischen Schaltvorgängen zwischen den Leitwerten null und  $2 G_0$ . Der Schaltvorgang beginnt mit einer etwa  $50 \mu\text{s}$  dauernden Vorphase, worauf der eigentliche Schaltvorgang innerhalb eines Zeitraums von weniger als  $14 \mu\text{s}$  folgt.

**Abb. 4:** Demonstration des Schaltens des Leitwerts zwischen null und einem vorgewählten höheren Leitwert von  $3 G_0$ . Der Leitwert des atomaren Schalters (b) wird direkt durch die Kontrollspannung  $U_{\text{Kontroll}}$  (a), angelegt zwischen der elektrochemischen Steuerelektrode und den Gold-Arbeits Elektroden, gesteuert. Wird die Kontrollspannung auf ein „Halte-Niveau“ gelegt (Pfeile), verbleibt der atomare Schalter stabil auf seinem Leitwert-Niveau.

### Literaturverzeichnis

[1]	P. Rai-Choudhury: <i>Handbook of Microlithography, Micromachining &amp; Microfabrication. Volume 1: Microlithography</i> / P. Rai-Choudhury (Ed.). - Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Pr.; London: Institution of Electrical Engineers, 1997.
[2]	International Technology Roadmap for Semiconductors, 2003 Edition Executive Summary.
[3]	C. Joachim, J. K. Gimzewski, A. Aviram, Nature 408 (2000) 541.
[4]	S. Datta <i>et al.</i> , Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 2530.
[5]	J. Reichert <i>et al.</i> , Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 176804.
[6]	N. Agrait, A. Levy Yeyati, J. M. van Ruitenbeek, Phys. Rep. 377 (2003) 81.
[7]	N. Agrait, J. G. Rodrigo, S. Vieira, Phys. Rev. B 47 (1993) 12345.

[8]	J. I. Pascual <i>et al.</i> , Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 1852.
[9]	J. M. Krasns <i>et al.</i> , Phys. Rev. B. 48 (1993) 14721.
[10]	C. Z. Li, N. J. Tao, Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 894.
[11]	C. Z. Li, A. Bogozzi, W. Huang, N. J. Tao, Nanotechnology 10 (1999) 221.
[12]	A. F. Morpurgo, C. M. Marcus, D. B. Robinson, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 2084.
[13]	D. P. E. Smith, Science 269 (1995) 371.
[14]	D. M. Eigler, C. P. Lutz, W. E. Rudge, Nature 352 (1991) 600.
[15]	H. Fuchs und Th. Schimmel, Adv. Mater. 3 (1991) 112.
[16]	Th. Schimmel, R. Kemnitzer, J. Küppers, H. Fuchs und M. Lux-Steiner, Thin Solid Films 254 (1995) 147.
[17]	R. N. Barnett, U. Landman: „Cluster-Derived Structures and Conductance Fluctuations in Nanowires“. <i>Nature</i> 387, 788-791 (1997).

## ANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Herstellung eines Schaltelementes, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement drei Elektroden besitzt, die sich in einem Elektrolyten befinden und von denen zwei Elektroden („Source“ und „Drain“) miteinander durch eine reversibel öffnende und schließbare Brücke aus einem oder mehr Atomen miteinander verbunden sind und das Öffnen und Schließen dieses Kontaktes zwischen Source- und Drain-Elektrode über das an die dritte Elektrode („Gate-Elektrode“) angelegte Potential gesteuert werden kann, wobei die Herstellung des Schaltelementes durch wiederholtes Anlegen von Potentialzyklen zwischen der Gate-Elektrode und der Source- bzw. Drain-Elektrode erfolgt, wobei das Potential während der Potentialzyklen solange erhöht und wieder abgesenkt wird, bis sich aufgrund des Wechsels des Potentials an der Gate-Elektrode der Leitwert zwischen Source- und Drain-Elektrode reproduzierbar als Funktion der Spannung der Gate-Elektrode zwischen zwei Leitwerten hin- und herschalten lässt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrisch leitende Brücke im On-State an ihrer engsten Stelle nur noch aus einem Atom oder aus wenigen Atomen besteht und mit dem Schalter ein elektrischer Stromkreis dadurch geöffnet und geschlossen wird, dass ein einzelnes Atom oder wenige Atome im Kontaktbereich ihre Position ändern (Einzelatomschalter und Pauciatomschalter).
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Leitfähigkeit der metallischen Brücke zwischen Source und Drain im „On-State“ (d.h. in dem Zustand, in dem Source und Drain elektrisch leitend miteinander verbunden sind, „geschlossene“ Brücke) gezielt auf einen vorher wählbaren Wert eingestellt werden kann, dadurch gekennzeichnet, dass ein elektrochemisches Abscheidopotential bei geöffneter Brücke („Off-State“) solange angelegt wird, bis der Leitwert der Brücke einen festgelegten Wert X überschreitet und anschließend ein Auflösepotential angelegt wird solange, bis der Leitwert einen festgelegten Wert Y unterschreitet und dann der Zyklisierungsprozess wieder von Neuem beginnt, wobei der Wert X so festgelegt wird, dass er nahe an dem gewünschten Leitwert liegt, in einer vorteilhaften

Ausführung 0 bis 20% von dem angestrebten Leitwert der Brücke im On-State abweicht und in besonders vorteilhafter Ausführung 5 bis 10 % unterhalb von diesem liegt und wobei der Wert Y nahe bei dem Leitwert null liegt und vorteilhafterweise 5 bis 15% eines Leitwertquantens beträgt.

4. Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 1 und 2 zur gezielten Konditionierung einer metallischen Brücke auf atomarer Skala mit vorherbestimmbarer, einstellbarer Leitfähigkeit.
5. Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 1 und 2 zur gezielten Konditionierung einer metallischen Brücke auf atomarer Skala mit vorherbestimmbarer, einstellbarer quantisierter Leitfähigkeit, wobei der Leitwert ein Vielfaches des Leitwertquantums beträgt.
6. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Metall für die öffnbare und schließbare Brücke zwischen Source und Drain Silber oder Kupfer oder Gold verwendet wird.
7. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Elektrolyt ein Feststoffelektrolyt, ein Ionenleiter, ein Polymer oder anderes System, in das bewegliche Ionen eingelagert sind, ein Polyanion mit eingelagerten mobilen Kationen, ein Polykation mit eingelagerten mobilen Anionen, ein Gel-Elektrolyt oder ein in ein Polymer oder in ein poröses, mikroporöses oder nanoporöses System eingelagertes ionisches System verwendet wird.
8. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein atomarer Schalter hergestellt wird, der bei Raumtemperatur betrieben werden kann bzw. der bei Temperaturen zwischen -30 Grad Celsius und +50 Grad Celsius betrieben werden kann bzw. der die üblichen Normen für die Betriebstemperaturspezifizierung elektronischer Bauelemente erfüllt.
9. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Metall für die öffnbare und schließbare Brücke zwischen Source und Drain ein ferromagnetisches Metall oder eine ferromagnetische Legierung, beispielsweise Nickel verwendet wird.

10. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Elektrolyt Silbernitrat im Falle von Silberkontakten und Kupfersulfat im Falle von Kupferkontakten verwendet wird
11. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Leitwerte, zwischen denen der Source-Drain-Leitwert hin- und hergeschaltet wird, null sowie ein von null verschiedener Wert sind.
12. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Leitwert zwischen Source und Drain der Leitwertquantisierung unterliegt und einen Wert annimmt, der annähernd ein ganzzahliges Vielfaches des Leitwertquantums  $G_0 = 2 e^2/h$  ist, wobei  $e$  die Elementarladung und  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum ist.
13. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der genannte Zyklisierungsprozess zwischen zwei oder mehr definierten Gate-Elektrodenpotentialen erfolgt, wobei die Spannung sprunghaft, in Form einer Dreiecksrampe, sinusförmig oder in Form einer anderweitigen Rampe variiert wird.
14. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die während des Zyklisierungsprozesses angelegte Spannung automatisch durch einen Regelkreis vorgegeben wird, der dafür sorgt, dass solange ein Potential angelegt wird, das durch elektrochemische Prozesse für eine Erhöhung des Leitwertes sorgt, bis ein voreingestellter Schwellwert für den Source-Drain-Leitwert überschritten ist, wobei dann automatisch mit oder ohne zeitliche Verzögerung und mit oder ohne Einbau einer Rampe stetig oder unstetig das Potential an der Gate-Elektrode in Richtung elektrochemischem Auflösepotential verändert wird, bis ein zweiter, voreingestellter Wert für den Source-Drain-Leitwert unterschritten wird, woraufhin das an die Gate-Elektrode angelegte Potential dann automatisch mit oder ohne zeitliche Verzögerung und mit oder ohne Einbau einer Rampe stetig oder unstetig in Richtung elektrochemischem Abscheidepotential verändert wird, bis ein voreingestellter Wert des Gate-Potentials erreicht ist oder bis ein voreingestellter Schwellwert für den Source-Drain-Leitwert überschritten ist und anschließend der genannte Zyklisierungsprozess von Neuem beginnt.

15. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der genannte Zyklisierungsprozess auch die Verwendung von Spannungspulsen an Stelle der oder zusätzlich zu den genannten periodischen oder durch einen Regelkreis gesteuerten oder anderweitig generierten Spannungsvariationen während des Zyklisierungsprozesses angelegt wird.
16. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass nach erfolgtem Zyklisierungsprozess die Veränderung des Source-Drain-Leitwertes gezielt durch Wechsel des an die Gate-Elektrode angelegten Potential zwischen zwei definierten Spannungswerten erfolgt.
17. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein bestimmter Zustand des Schaltelementes dadurch gehalten wird, dass ein bestimmtes Haltepotential an die Gate-Elektrode angelegt wird, wobei der Wert dieses Haltepotentials für den oberen Leitwert („On-State“) und den niedrigeren Leitwert („Off-State“) unterschiedlich sein kann.
18. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein atomarer Schalter hergestellt wird, der im On-State einen Source-Drain-Leitwert von einem n-fachen des Leitwertquantums besitzt, wobei n eine vorher bestimmbare ganze Zahl ist und der atomare Schalter mit dem vordefinierten On-State-Leitwert dadurch hergestellt wird, dass während des Zyklisierungsprozesses die obere Schranke des Leitwertes, die überschritten sein muss, bevor die Regelung das Potential an der Gate-Elektrode Richtung Auflösepotential verändert wird, in der Nähe oder geringfügig, vorteilhafterweise um 1% bis 20% eines Leitwertquantums unterhalb des beabsichtigten On-State-Leitwertes vom n-fachen des Leitwertquantums liegt.
19. Anwendung des mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 hergestellten Schaltelementes zur Herstellung eines Schaltelementes oder Relais, dessen einzige bewegliche Teile die die Source- und Drain-Elektrode verbindenden Atome sind.
20. Anwendung des mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 hergestellten Schaltelementes zur Herstellung eines Schaltelementes oder Relais, dessen einziges bewegliches Teil ein einzelnes die Source- und Drain-Elektrode verbindenden Atome ist („Einzelatom-Relais“).

21. Anwendung des mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 hergestellten Schaltelementes als atomaren Transistor oder atomares Relais sowie als Bauelement zum Aufbau logischer Schaltungen und zur Durchführung logischer Operationen.
22. Anwendung des mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 hergestellten Schaltelementes als Widerstandsstandard mit einem Leitwert von exakt einem Leitwertquantum oder einem ganzzahligen Vielfachen dieses Wertes.
23. Anwendung des mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 hergestellten Schaltelementes im Bereich der Datenspeicherung als einzelnes Speicherbit anstelle eines konventionellen Transistors.
24. Anwendung des mit dem Verfahren gemäß Anspruch 1 hergestellten Schaltelementes als Relais oder Transistor im Bereich ultrahoher Frequenzen vom Megahertz-Bereich über den Gigahertz- bis zum Terahertz-Bereich.
25. Verfahren und Bauelement gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Umschalten nicht zwischen einem nicht-leitenden Zustand ("Off-State") und einem leitenden Zustand ("On-state") erfolgt, sondern zwischen zwei unterschiedlichen leitenden Zuständen, wobei beim Zyklisierungsprozess der untere Leitwert, bei dem das Kontrollpotential geändert wird, nicht nahe bei null, sondern nahe bei dem gewünschten unteren der beiden Leitwerte liegt, zwischen denen der Leitwert hin- und hergeschaltet werden soll.
26. Verfahren gemäß Anspruch 1 und 25 dadurch gekennzeichnet, dass einer oder beide Niveaus ganzzahlige Vielfache des Leitwertquantums sind.
27. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die quantisierten Widerstände von  $2e^2/h$  und Vielfachen dieses Wertes als Leitwertnormale sowie als nahezu fehlerfreie und driftfreie Widerstandsstandards in elektronischen und nanoelektronischen Schaltungen verwendet werden.
28. Anwendung des Verfahrens und des Bauteils gemäß Anspruch 1 und 27, dadurch gekennzeichnet, dass die so hergestellten Widerstände als Referenzwiderstände und als Präzisionswiderstände mit voreinstellbarem Wert verwendet werden, die frei sind von thermischer Drift, d.h. von Veränderungen des Widerstandswertes als Funktion der Temperatur.

29. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zwei oder mehr verschiedene Metalle galvanisch in der Lücke zwischen den beiden Elektroden abgeschieden werden, so dass der Kontakt zwei oder mehr verschiedene Metalle enthält.
30. Verfahren gemäß Anspruch 1 und 29, dadurch gekennzeichnet, dass die Abscheidung der zwei oder mehr unterschiedlichen Metalle gleichzeitig oder nacheinander erfolgt oder auf einer Elektrode ein Metall und nach Austausch des Elektrolyten und/oder Änderung der Abscheidespannung auf der anderen Elektrode das andere Metall abgeschieden wird.
31. Verfahren gemäß Anspruch 1 und 25, dadurch gekennzeichnet, dass ein quantisierter Multilevel-Transistor auf atomarer Skala hergestellt wird, dadurch gekennzeichnet, dass der Leitwert nach Training des Kontaktes durch Zyklisierung mit mehr als zwei aufeinanderfolgenden Niveaus hergestellt wird.
32. Verfahren gemäß Anspruch 1, 25 und 31, dadurch gekennzeichnet, dass der Multileveltransistor zur Datenspeicherung von mehr als einem Bit pro Bauteil bzw. pro Transistor verwendet wird.
33. Verfahren und Bauteil gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Bauteil die Funktion eines Transistors, Quantentransistors oder Relais in einer atomaren Logikschaltung, in nanoelektronischen Schaltungen oder innerhalb von molekularelektronischen Schaltungen annimmt.

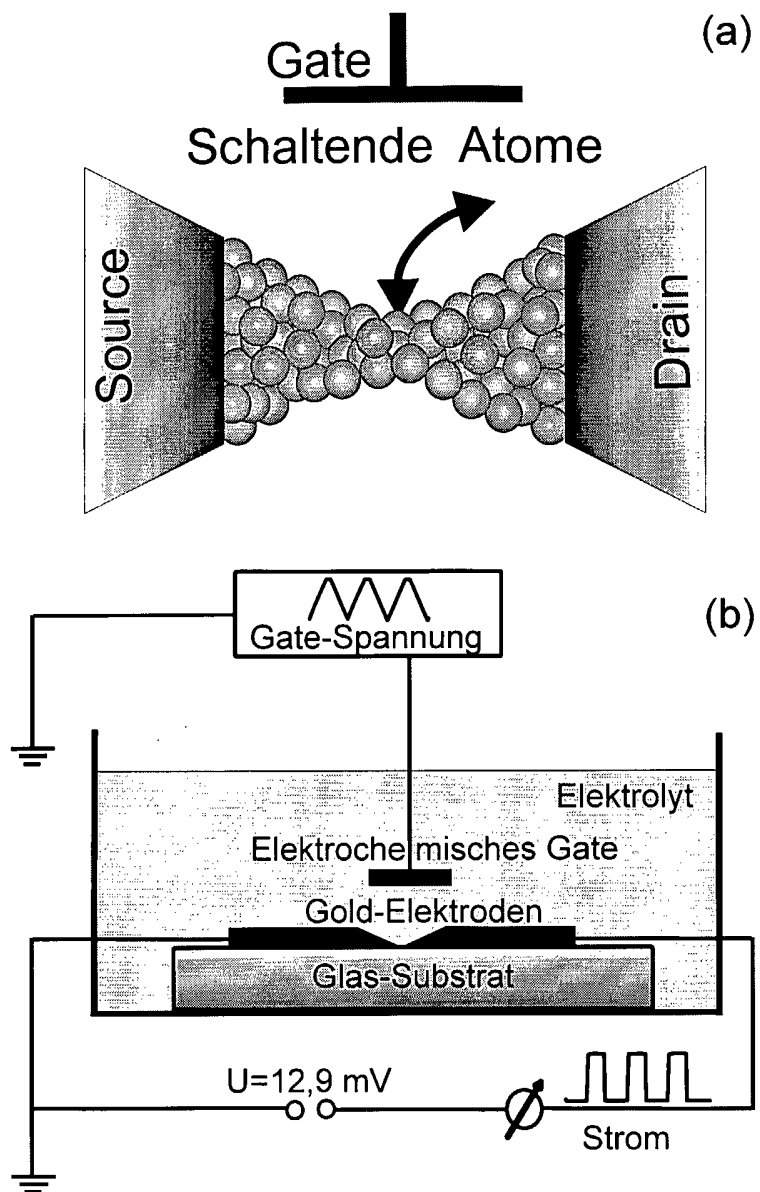


Abb. 1.

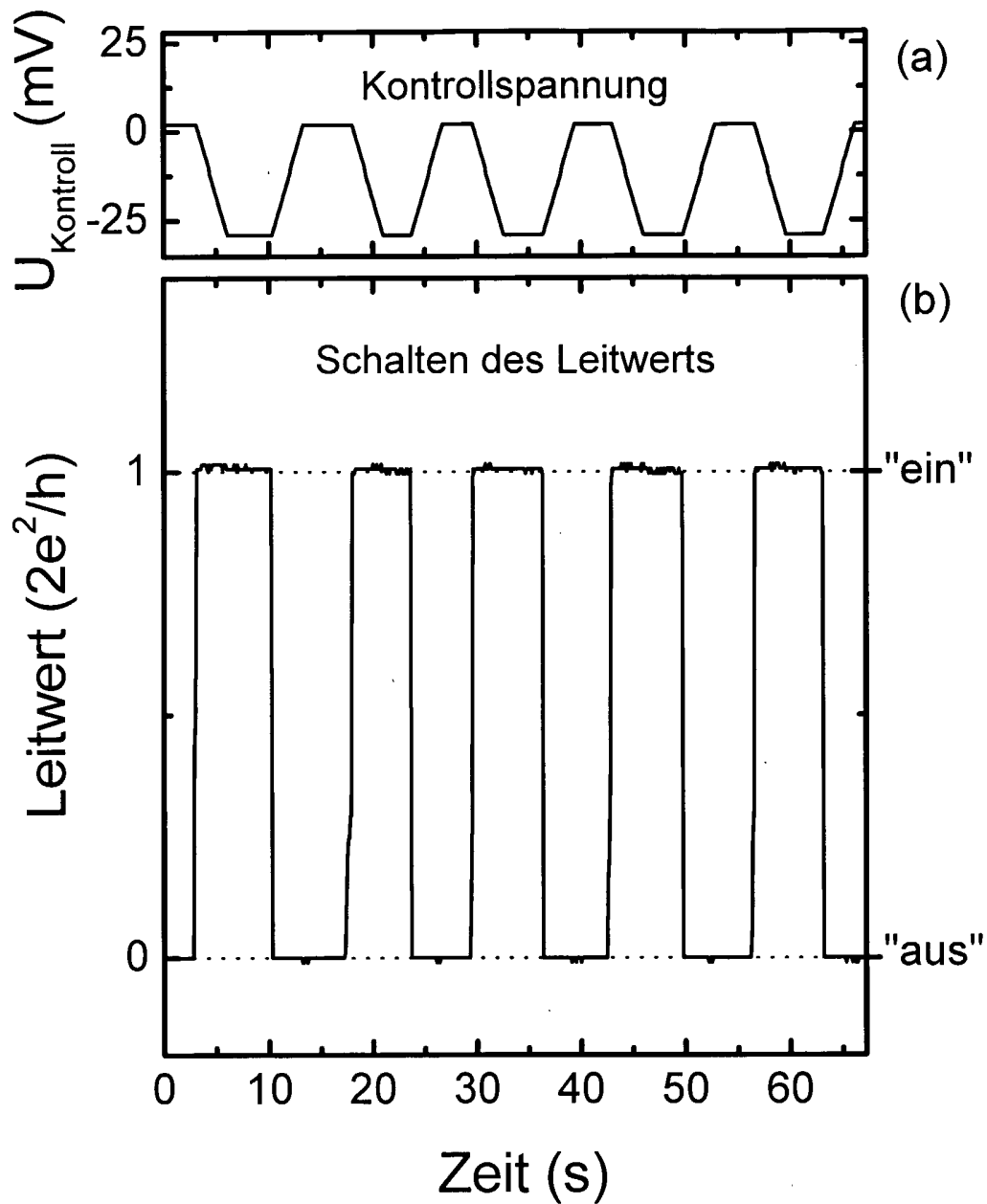


Abb. 2:

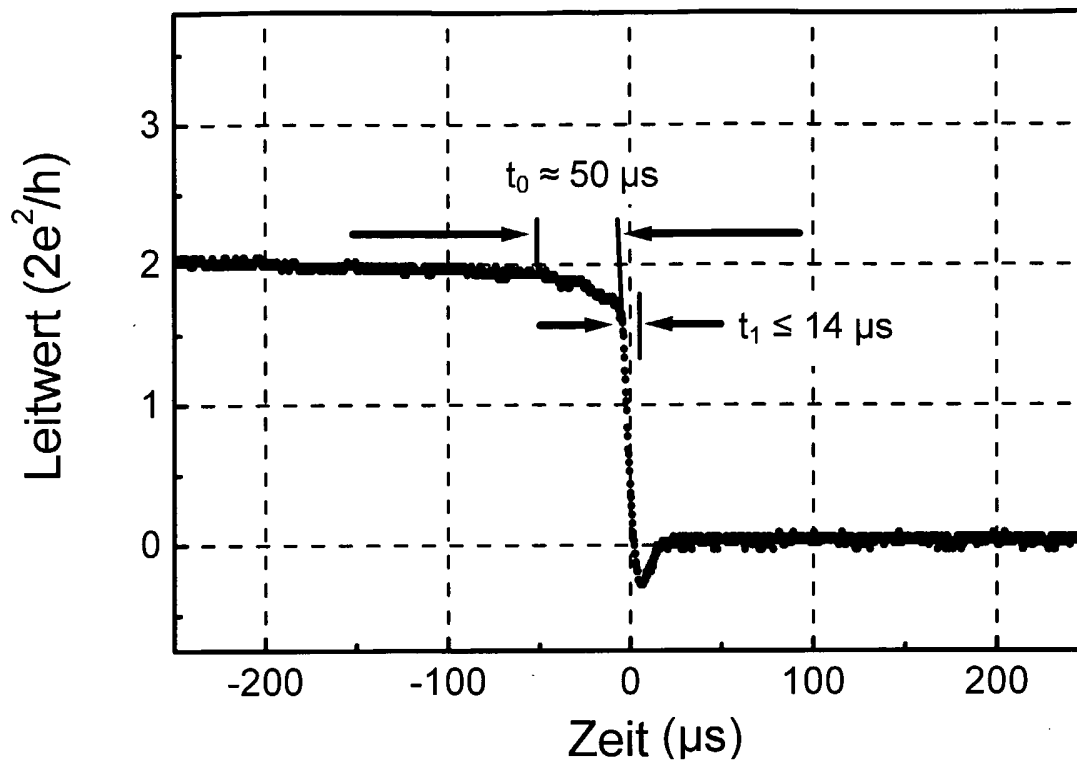


Abb. 3:

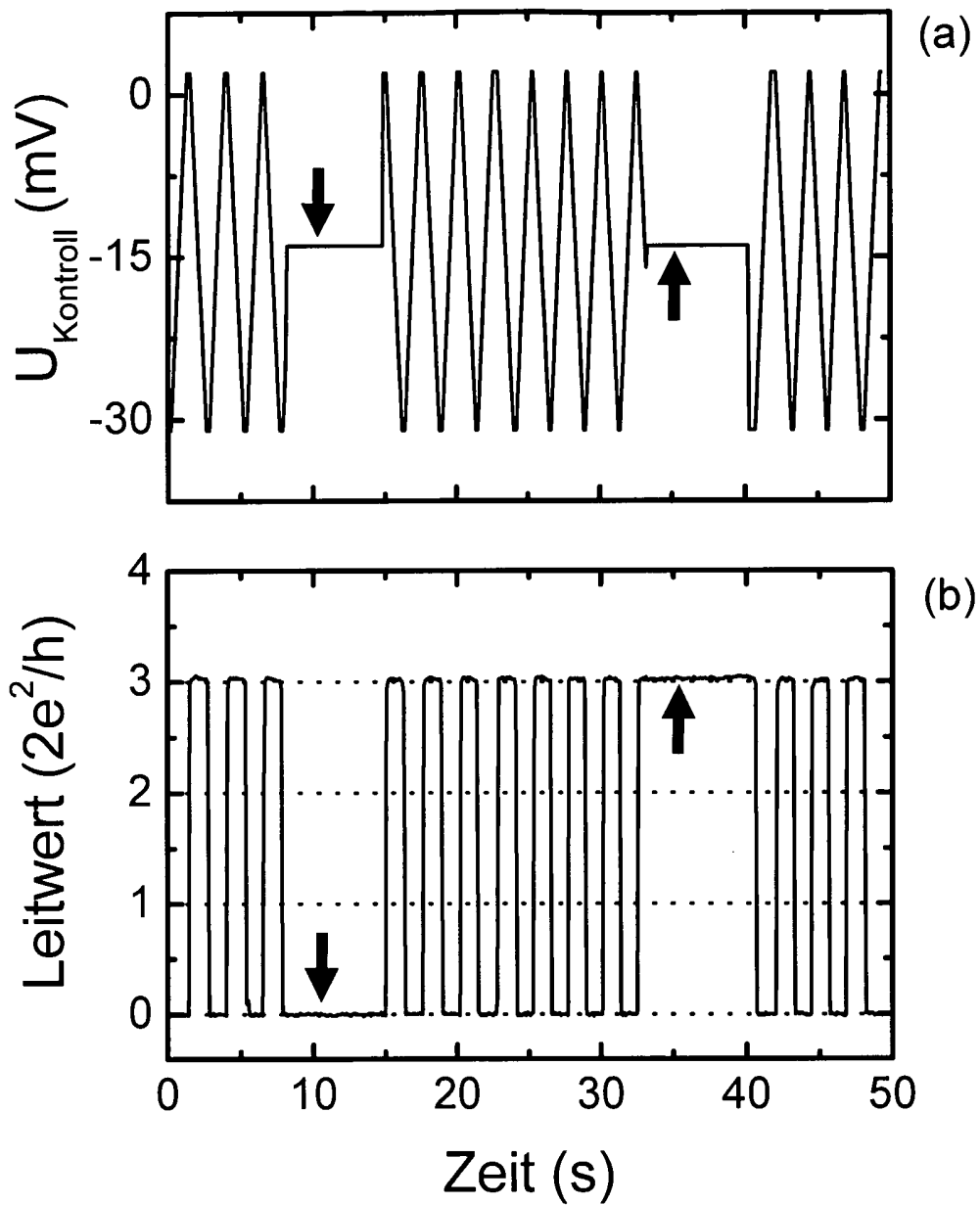


Abb. 4: