



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 30 761 T2** 2007.09.20

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 236 206 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G11C 13/02** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 30 761.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US00/18805**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 947 182.2**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2001/043138**

(86) PCT-Anmeldetag: **10.07.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **14.06.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **04.09.2002**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **13.09.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **20.09.2007**

(30) Unionspriorität:

459246 10.12.1999 US

(73) Patentinhaber:

**The Regents of the University of California,
Oakland, Calif., US**

(74) Vertreter:

**Patentanwälte Lippert, Stachow & Partner, 51427
Bergisch Gladbach**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(72) Erfinder:

**HEATH, Richard, James, Santa Monica, CA 90405,
US; COLLIER, Patrick, Charles, Los Angeles, CA,
US; MATTERSTEIG, Gunter, Battaune
Beieilenburg, DE; RAYMO, M., Francisco, Los
Angeles, CA 90024, US; STODDART, Fraser,
James, Santa Monica, CA 90403, US; WONG, Eric,
Los Angeles, CA 90036, US**

(54) Bezeichnung: **FLÜCHTIGER UND NICHTFLÜCHTIGE SCHALTELEMENTE AUF MOLEKULARER BASIS**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung wurde mit Unterstützung der Regierung unter Vertrag Nr. DABT63-99-3-0003, gewährt von der U.S. Army, gemacht. Die Regierung hat gewisse Rechte an dieser Erfindung.

TECHNISCHER HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Technisches Gebiet der Erfindung

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein elektronische Elemente, die als Speicher und zur Datenspeicherung gestaltet sind. Sie betrifft auch allgemein elektronische Bauteile, die für das Schalten und das Lenken (routing) elektrischer Signale gestaltet sind. Die Erfindung betrifft auch allgemein elektronische Bauteile, deren kritische Abmessungen in Nanometer gemessen werden, und insbesondere einfache Bauteile, die als Bausteine zum Aufbau komplizierterer Strukturen verwendet werden, und auf Verfahren zur Bildung solcher Bauteile.

2. Stand der Technik

[0003] Der Direktzugriffsspeicher (RAM, random access memory) wird ein immer wichtigerer Bestandteil der elektronischen Hardware, mit Anwendungen im Bereich von "intelligenten Kreditkarten" bis zu Computerspeichern, um nur zwei zu nennen. Der dynamische Direktzugriffsspeicher (DRAM) beruht auf der Technologie der Siliziumherstellung, und ist ein flüchtiger Speicher, charakterisiert durch zerstörendes Lesen. Das bedeutet, dass es notwendig ist, den Speicherbits zu jeder Zeit Spannung zu liefern, oder die Information verschwindet. Außerdem gehört zu jedem Speicherelement ein Transistor. Das bedeutet, dass solche Speichervorrichtungen niemals mit einer Dichte gefertigt werden, die größer ist als von der gegenwärtigen Generation der Lithographie erlaubt. Schließlich zerstört das Lesen des Zustands eines DRAM-Bits die Information in diesem Bit.

[0004] Neuerdings wurde von mehreren Unternehmen ein Bauteil namens ferromagnetisches RAM oder Fe-RAM entwickelt. Ein Fe-RAM ist ein nicht-flüchtiges Speicherbit, das in ein sog. Koppelspeicherfeld (cross-point memory array) eingegliedert werden kann (siehe US 5,640,343). Der Vorteil eines solchen Feldes ist, dass die einzelnen Fe-RAM-Bauteile nicht für jedes Speicherbit einen Transistor benötigen, sondern für n Speicherbits nur großordnungsmäßig $n^{1/2}$ Transistoren. Fe-RAM ist jedoch durch destruktives Lesen gekennzeichnet, ähnlich wie DRAM. Fe-RAM-Bauteile beruhen auf dem Prinzip der Anwendung eines elektrischen Feldes für die Änderung des magnetischen Moments eines Ferromagneten. Bei gewissen Materialien gibt es auch eine kleine Änderung des elektrischen Widerstands

des ferromagnetischen Materials, wenn dieses magnetische Moment geändert wird. Bei sehr kleinen Domänen funktioniert dieses Schaltverhalten nicht mehr, weil ferromagnetische Materialien ihren ferromagnetischen Charakter nicht beibehalten, wenn die Materialgröße sehr klein wird (d.h. kleiner als 30 nm). Schließlich ist der Unterschied im Widerstand zwischen dem "1"- und dem "0"-Zustand in einem Fe-RAM-Bauteil etwa 15%. Das bedeutet, dass nur relativ kleine Koppelspeicherfelder (kleiner als 1 MB) aus Fe-RAM aufgebaut werden können. Es bedeutet auch, dass Fe-RAM-Bauteile nur als Speicherbits wirken können. Sie können nicht als echte Schalter arbeiten.

[0005] Neuerdings wurden elektronische Bauteile entwickelt, die aus zwei gekreuzten Leitern aufgebaut sind, zwischen denen eine elektrisch adressierbare Molekülspezies eingelagert ist. Diese Bauteile sind einfach und billig herzustellen. Die Bauteile können auch extrem klein gemacht werden mit Abmessungen von der Größenordnung einiger Mikrometer bis hinab zu mehreren Nanometern. Diese Bauteile können zum Herstellen von Koppelschaltfeldern (cross bar switch arrays), Logikbausteinen, Speicherbausteinen und Kommunikations- und Signallenkungsbausteinen verwendet werden. Kreuzleiter- oder Kreuzschienenbauteile sind in folgenden Patentanmeldungen offenbart:

US-Patentanmeldung Serial Number 09/292,767 und 09/280,048, Bezeichnung "Chemically Synthesized and Assembled Electronic Devices (Chemisch synthetisierte und montierte Elektronikbauteile)" [PD-10981971-1], jetzt US 6,459,095; US 6,846,682 und US 6,903,366; US-Patentanmeldung Serial Number 09/280,225, Bezeichnung "Molecular Wire Crossbar Interconnects for Signal Routing and Communications (Molekulare Kreuzleiterverbindungen zur Signallenkung und Kommunikation)" [PD-10981966-1], jetzt US 6,314,019; US-Patentanmeldung Serial Number 09/280,189, Bezeichnung "Molecular Wire Crossbar Memory (molekulare Kreuzleiterspeicher)" [PD-10981968-1], jetzt US 6,128,214;

US-Patentanmeldung Serial Number 09/282,045, Bezeichnung "Molecular Wire Crossbar Logic (Logikschaltung mit molekularem Kreuzleiter)" [PD-10981969-1];

US-Patentanmeldung Serial Number 09/282,049, Bezeichnung "Demultiplexer for a Molecular Wire Crossbar Network (Demultiplexer für ein molekulares Kreuzleiternetz)" [PD-10981970-1], jetzt US 6,256,767;

US-Patentanmeldung Serial Number 09/280,188 "Molecular Wire Transistors (Transistoren mit molekularen Leitern)" [PD-10981967-1].

[0006] Vincenzo Balzani et al., "Molecular Machines", Accounts of Chemical Research, Band 31, Nr. 7, 28. Mai 1998, Seiten 405–414, beschreiben Mole-

küle wie Catenane, die in Lösung elektrochemisch oder chemisch manipuliert werden können, sodass die Moleküle ein mechanisches Verhalten zeigen. Im Beispiel von [2]-Catenanen wird ein Molekül veranlasst, in einem anderen zu rotieren. Das Dokument erwägt, dass diese mechanische Wirkung in Maschinen von molekularem Maßstab nützlich sein könnte.

[0007] C. P. Collier et al., "Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates (Elektronisch konfigurierbare molekulare Logikgatter)", Science, American Association for the Advancement of Science, Band 285, Nr. 5426, 16 Juli 1999, Seiten 391–394, beschreiben ein Bauteil mit einer Monoschicht aus Molekülen und Schichten einer Tunnelschwelle, die zwischen zwei Anschlüssen sandwichartig eingefügt sind. Die Moleküle sind Rotoxane, welche ein hantelförmiges Molekül umfassen, das auch ein oder mehrere, das hantelförmige Molekül umgebende ringförmige Moleküle aufweisen kann. Das Bauteil (Schalter) ist anfänglich geschlossen, kann aber durch Anlegen einer Spannung von +0,7 V über einige Minuten irreversibel geöffnet werden, wobei die Rotoxane oxydiert werden, was den Widerstand der Rotoxane bei der Lesespannung erhöht. Das Bauteil kann mit einer Spannung von etwa –2 V gelesen werden. Der Oxydationsvorgang verändert die hantelförmigen Moleküle, welche das erwünschte Verhalten selbst in Abwesenheit der ringförmigen Moleküle zeigen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0008] Nach einer ersten Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung wird ein molekulares Halbleiterschaltbauteil bereitgestellt, umfassend einen ersten Anschluss, einen zweiten Anschluss und bistabile Moleküle, die zwischen das erste und das zweite Anschlusselement sandwichartig eingelegt sind, dadurch gekennzeichnet, dass die bistabilen Moleküle eine Monoschicht aus [2]-Catenanmolekülen sind.

[0009] Nach einer zweiten Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zur Herstellung eines molekularen Halbleiterschaltbauteils bereitgestellt, dadurch gekennzeichnet, dass es einen Schritt der Bildung einer Monoschicht von Catenanmolekülen umfasst, die zwischen zwei Anschlusselemente sandwichartig eingelegt sind, wobei dieser Schritt der Monoschichtbildung den Schritt des Mischens einer ausreichenden Menge Gegenionen mit Catenanmolekülen umfasst, um eine filmbildende Mischung bereitzustellen, die elektrisch neutral und zur Verwendung bei der Bildung der Monoschicht aus Catenanmolekülen geeignet ist.

[0010] Erfindungsgemäß wurde gefunden, dass gewisse [2]-Catenane zur Bildung dünner Filme verwendet werden können, die besonders gut für die

Herstellung von Halbleiter-Kreuzleiterelementen geeignet sind. Die auf [2]-Catenanen beruhenden Schaltbauteile können flüchtig oder nichtflüchtig sein und sind durch nichtzerstörendes Lesen gekennzeichnet. Sie zeigen eine große Widerstandsdifferenz zwischen den Zuständen "0" und "1" und beruhen nicht auf makroskopischen physikalischen Erscheinungen, die bei sehr kleinen Längenabmessungen verschwinden. Die Bauteile, welche [2]-Catenan als bistabiles elektrisch ansprechbares Molekül einsetzen, das zwischen gekreuzten Leitern sandwichartig eingelegt ist, können als Speicherbits oder als Schalter verwendet werden, die selbst bei sehr kleiner Abmessung weiterarbeiten.

[0011] Die vorliegende Erfindung ist auf molekulare Halbleiterschaltbauteile gerichtet, welche gekreuzte Leiter umfassen, die erste und zweite Anschlüsse bilden, zwischen denen ein [2]-Catenanmolekül eingelegt ist. Die Schaltelemente können in Speicherzellen, Lenkungsschaltungen, Nicht-Gliedern (inverters) oder programmierbaren Logikanordnungen (field programmable devices) verwendet werden, welche Diodenverhalten zeigen können oder auch nicht. Die Erfindung umfasst auch Verfahren zur Herstellung der Elemente, umfassend die Bildung einer Monoschicht aus [2]-Catenanmolekülen unter Verwendung von Gegenionen im filmbildenden Gemisch.

[0012] Die oben beschriebenen und viele andere Merkmale und damit verbundenen Vorteile der vorliegenden Erfindung werden besser verständlich durch Bezug auf die folgende eingehende Beschreibung in Verbindung mit den beigegebenen Zeichnungen.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0013] [Fig. 1](#) ist ein Strom-Spannungs-Diagramm und zeigt die Hystereseschleife für einen nichtflüchtigen Schalter.

[0014] [Fig. 2](#) ist ein Strom-Spannungs-Diagramm und zeigt die Hystereseschleife für einen flüchtigen Schalter.

[0015] [Fig. 3](#) ist eine vereinfachte schematische Darstellung des molekularen Schaltmechanismus der [2]-Catenanmoleküle, die in den erfindungsgemäßen Bauteilen verwendet werden.

[0016] [Fig. 4A](#) zeigt die Struktur eines bevorzugten beispielhaften [2]-Catenans.

[0017] [Fig. 4B](#) illustriert im molekularen Maßstab den Schaltmechanismus für die [2]-Catenane.

[0018] [Fig. 5A](#) ist ein Diagramm der Energieniveaus eines flüchtigen molekularen Schalters.

[0019] [Fig. 5B](#) ist ein Diagramm der Energieniveaus eines nichtflüchtigen molekularen Schalters.

veaus eines nichtflüchtigen molekularen Schalters.

[0020] [Fig. 6](#) zeigt ein bevorzugtes beispielhaftes Gegenion, das zur Herstellung von Filmen verwendet wird, die bei der Herstellung von erfindungsgemäßen Elementen verwendet werden.

[0021] [Fig. 7](#) zeigt eine schematische Darstellung der Fabrikationsschritte für erfindungsgemäße flüchtige und nichtflüchtige Elemente.

[0022] [Fig. 8](#) ist ein Graph, der die Hystereseschleife für ein erfindungsgemäßes flüchtiges Element darstellt.

[0023] [Fig. 9](#) ist ein Graph, der das zyklische Schalten eines beispielhaften erfindungsgemäßen nichtflüchtigen molekularen Schalters auf Basis [2]-Catenan zeigt. Das Element wird durch Beschreiben mit +2 V in den Zustand "offen" oder "0" versetzt. Durch Beschreiben mit -2 V wird es in den Zustand "geschlossen" oder "1" gebracht. Das Bauteil wird mit +0,1 V gelesen. Der Graph zeigt den Widerstand des Bauteils, wenn es zwischen beiden Zuständen hin- und hergeschaltet wird.

EINGEHENDE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Definitionen

[0024] Mol_RAM, wie es hier benutzt wird, bedeutet ein Speicherzellenfeld auf der Basis von molekularen Schaltern.

[0025] Ein Speicherbit, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf ein physikalisches Element, das in zwei Zuständen ("0" oder "1") bestehen kann, die durch elektrisches Sondieren des Elements voneinander unterscheidbar sind.

[0026] Ein Schalter, wie hier benutzt, bedeutet ein physikalisches Element, das zwischen zwei Zuständen, wie "offen" und "geschlossen" schalten kann, und bei dem der Unterschied zwischen beiden Zuständen elektronisch sondiert werden kann. Der Unterschied zwischen beiden Zuständen ist typischerweise größer als bei einem Speicherbit. Wenn beispielsweise die zum Bestimmen des Zustands des Elements gemessene elektrische Eigenschaft der Widerstand ist, dann kann ein Speicherbit durch eine Widerstandsänderung von 20% gekennzeichnet sein, während ein Schalter durch eine Änderung des Widerstands um 200% charakterisiert sein kann. Ein Schalter kann als Speicherbit verwendet werden, aber ein Speicherbit ist nicht unbedingt als Schalter brauchbar.

[0027] Selbstorganisiert (self-assembled), wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf ein System, das

wegen der Identität seiner Komponenten von Natur aus ein gewisses geometrische Muster annimmt; das System erreicht durch Annahme dieser Konfiguration zumindest ein lokales Minimum seiner Energie.

[0028] Einmal einstellbar (singly configurable), wie es hier benutzt wird, bedeutet, dass ein Schalter seinen Zustand nur einmal durch einen irreversiblen Vorgang wie eine Oxydations- oder Reduktionsreaktion ändern kann; ein solcher Schalter kann beispielsweise die Grundlage für einen programmierbaren Festwertspeicher (PROM) bilden.

[0029] Mehrfach einstellbar (reconfigurable), wie es hier benutzt wird, bedeutet, dass ein Schalter seinen Zustand über einen reversiblen Vorgang wie eine Oxydation oder Reduktion mehrmals ändern kann; mit anderen Worten kann der Schalter mehrmals geöffnet und geschlossen werden wie die Speicherbits in einem Direktzugriffsspeicher (RAM).

[0030] Redoxaktiv, wie es hier benutzt wird, bedeutet, dass ein Molekül oder eine molekulare Verbindung elektrochemisch reduziert oder oxydiert werden kann, d.h. dass elektrische Ladung den Molekülen oder molekularen Verbindungen zugefügt oder von diesen weggenommen werden kann.

[0031] Abmessung im Mikronmaßstab, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf Abmessungen von 1 µm bis zu wenigen µm Größe.

[0032] Abmessung im Submikronmaßstab, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf Abmessungen von 1 µm bis hinab zu 0,04 µm.

[0033] Abmessung im Nanometermaßstab, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf Abmessungen von 0,1 nm bis 50 nm (0,05 µm).

[0034] Leiter im Mikron- und Submikronmaßstab, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf stab- oder bandförmige Leiter aus Halbleitern mit Breiten oder Durchmessern von der Abmessung 1 bis 10 µm, Höhen, die von wenigen Zehntel nm bis zu einem µm reichen können und Längen von einigen µm und mehr.

[0035] [2]-Catenane, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf molekulare Verbindungen, die aus zwei oder mehr ineinandergreifenden Ringen bestehen, von denen jede als getrenntes und unterschiedliches Molekül hergestellt werden kann. Catenane können elektrisch geladen werden (d.h. dass sie Molekülionen sind), wobei sie dann oft mit einem Gegenion entgegengesetzter Ladung verbunden sind.

[0036] Ein bevorzugtes Catenan ist $[C_{70}H_{76}N_4O_{10}S_4]^{4+}$. Verfahren zur Herstellung von [2]-Catenan sind bekannt. Siehe z.B. M. Asakawa, P.

R. Ashton, V. Balzani, A. Credi, C. Hamers, G. Mästersteig, M. Montalti, A. N. Shipway, N. Spencer, J. F. Stoddart, M. S. Tolley, M. Venturi, A. J. P. White, and D. J. Williams, "A chemically and electrochemically switchable [2]-Catenane incorporating a tetrathiafulvalene unit," *Angewandte Chemie International Edition in English*, Band 37, S. 333 (1998).

[0037] Hysterese, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf die Eigenschaft einer Strom-Spannungs-Messung, wobei die Vorwärts-Spannungskennlinie (Spannung von negativ nach positiv) sich kennzeichnend von der Rückwärts-Spannungskennlinie (Spannung von positiv nach negativ) unterscheidet. V_{LH} bezieht sich auf das Ende der Hystereseschleife bei niedriger Spannung und V_{HH} bezieht sich auf das Ende der Hystereseschleife bei hoher Spannung. V_{MH} ist ein gewisser Spannungswert zwischen V_{LH} und V_{HH} .

[0038] Flüchtig, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf eine Speicherzelle, welche die gespeicherte Information verliert, wenn an ihr kein elektrisches Potential anliegt.

[0039] Nichtflüchtig, wie es hier benutzt wird, bezieht sich auf eine Speicherzelle, welche die gespeicherte Information in Abwesenheit eines anliegenden elektrischen Potentials behält.

[0040] Nicht zerstörendes Lesen, wie hier benutzt, bezieht sich auf den Betrieb einer Speicherzelle derart, dass die Information in der Zelle ohne Beeinträchtigung des Zustands des Speicherbits gelesen werden kann.

[0041] Ein Speicherzellenfeld auf Basis molekularer Schalter (Mol-RAM) ist ein Feld elektrisch ansprechbarer molekularer Schalter, von denen jeder eine "1" oder eine "0" speichern kann, oder im "geschlossen" oder "offenen" Zustand sein kann. Jede Speicherzelle ist ein Tunnelübergangselement (TJ), das aus zwei Leitern besteht, zwischen denen eine dünne Schicht von Molekülen eingelegt ist. Durch Verwendung unterschiedlicher Elektrodenmaterialien wird dem Element ein Diodenverhalten verliehen, wodurch sich eine Abwandlung der gebräuchlichen Metall¹-Isolator-Metall²-Diode (M¹IM²), wobei M¹ und M² verschiedene Metalle sind, oder einer Metall-Isolator-Halbleiter-Diode (MIS) ergibt.

[0042] Bei den obigen Elementen umfasst der Isolator die Molekülschicht und die Art der Isolierschicht hängt von den elektrischen Eigenschaften der Moleküle ab. Die dünne Molekülschicht (z.B. eine Monoschicht) besteht aus redoxaktiven [2]-Catenanmolekülen, die geladen sind, und den entsprechenden Gegenionen. Jede Speicherzelle des Feldes wird durch nur zwei Leiter gesteuert. Der Betrieb des Elements beruht auf der reversiblen Oxydation und Re-

duktion des molekularen Übergangs. Bei gewissen sehr speziellen Typen des molekularen Übergangs kann eine Hystereseschleife gemessen werden, wenn eine variable Spannung an den Übergang angelegt wird und die Reaktion des Übergangs durch Messung des Stroms oder des Widerstands des Übergangs geprüft wird.

[0043] Der Betrieb eines Elements mit einer Hystereseschleife als Grundlage für einen mehrfach einstellbaren Schalter oder ein Speicherelement ist in [Fig. 1](#) gezeigt. Wenn eine von einer niedrigen (**12**) zu einer hohen (**13**) Spannung veränderliche Spannung an das Element angelegt wird, beobachtet man einen Strom, der einem spannungsabhängigen Pfad (**16**) folgt. Wenn jedoch die Spannung von einem hohen Wert (**13**) zu einem niedrigen (**12**) abtastet, beobachtet man einen Strom, der einem anderen spannungsabhängigen Pfad (**17**) folgt. Legt man eine Spannung zwischen zwei Werten (**14** und **15**) an das Element an, dann hängt daher der gemessene Strom von der Vorgeschichte des Elements ab. Bei der Kurve der [Fig. 1](#) kann ein Hochstromzustand (eine "1" oder ein "geschlossener" Schaltzustand) durch Anlegen einer gewissen niedrigen Spannung (**12**) eingeschrieben werden, und dann kann das Element bei einer gewissen Zwischenspannung (zwischen **14** und **15**) gelesen werden. Ein Niedrigstromzustand (eine "0" oder ein "offener" Schaltzustand) kann dem Element durch Anlegen einer gewissen hohen Spannung (**13**) eingeschrieben werden, und dieser Zustand kann wiederum bei einer gewissen Zwischenspannung (**14** bis **15**) ausgelesen werden. Wenn die Hystereseschleife durch den 0-Volt-0-Strom-Punkt (**18**) geht, wird der Schalter als "nichtflüchtig" betrachtet. Wenn die Prüfung des Elementzustands bei einer gewissen Spannung zwischen (**14**) und (**15**) den Elementzustand nicht ändert, dann wird dieser Vorgang als "nicht zerstörendes" Lesen angesehen.

[0044] Ein zweiter Typ einer Hystereseschleife, der ebenfalls zur Speicherung oder für einen mehrfach einstellbaren Schalter brauchbar ist, wird in [Fig. 2](#) gezeigt. In diesem Fall ist die Hystereseschleife der Strom-Spannungs-Kennlinie gegen den 0-Volt-0-Strom-Punkt (**28**) verschoben und die Hystereseschleife (**27**, **26**) ist um eine von 0 verschiedenen Spannung zentriert. Der Betrieb des Elements ist jedoch ähnlich. Das Element wird durch Anlegen entweder einer niedrigen (**22**) oder einer hohen (**23**) Spannung eingeschrieben. Ähnlich wie im vorstehenden Fall wird für das Element ein Zustand "1" oder "geschlossen" angenommen, wenn der Elementwiderstand niedrig oder die Größenordnung des durch das Element fließenden Stroms hoch ist. Umgekehrt wird ein Elementzustand von "0" oder "offen" angenommen, wenn der Elementwiderstand hoch oder die Größenordnung des durch das Element fließenden Stroms niedrig ist. Wenn der Zustand des Elements durch Verfolgen des Stroms bei einer Span-

nung im Bereich (24 bis 25) gelesen wird, dann hängt dieser Zustand von der Vorgeschichte des Elements wie folgt ab: Wenn das Element zuvor bei niedriger Spannung (22) eingeschrieben wurde, liest man bei einer gewissen Zwischenspannung (24 bis 25) einen "Hoch"-Zustand. Wenn das Element bei einer Spannung auf der Seite hoher Spannung der Hystereseschleife (23) eingeschrieben wurde, dann liest man bei einer gewissen Zwischenspannung (24 bis 25) einen "Niedrig"-Zustand.

[0045] Abwandlungen der [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#), bei denen die Hystereseschleife (16, 17; 26, 27) gleich erscheint, aber die Wirkung der Vorwärts- und Rückwärtsabtastung der Spannung das Gegenteil der [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) ist, sind möglich. Abwandlungen der [Fig. 2](#), bei denen die Hystereseschleife (26, 27) bei negativen Spannungen erscheint, sind ebenfalls möglich.

[0046] Ein Element, das eine Hystereseschleife wie die in [Fig. 2](#) gezeigte aufweist, kann nichtflüchtig gemacht werden, indem die Elektrodenmaterialien so angepasst werden, dass das chemische Potential zwischen beiden Elektroden (der Unterschied der Fermi-Energien) gleich einem gewissen Wert im Spannungsbereich der "Lese"-Stufe (24 bis 25) ist.

[0047] Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine hysteretische Strom-Spannungs-Kennlinie in einer dünnen elektrochemischen Halbleiterzelle zu erzeugen, die aus redoxaktiven Molekülen besteht. Die meisten redoxaktiven Moleküle zeigen keine hysteretische Strom-Spannungs-Kennlinie und deshalb muss die Hysterese in das Molekül "eingebaut" werden. Ein Lösungsweg ist die Synthese eines bistabilen Moleküls, bei dem beide Zustände über Oxydations-/Reduktionsvorgänge zugänglich sind und bei dem die Zustände durch eine Energieschwelle getrennt sind. Schließlich verleiht diese Energieschwelle der Strom-Spannungs-Kennlinie die Hysterese. Wenn ein Molekül bei der Oxydation oder Reduktion eine wesentliche Umlagerung erfährt, dann erfordert dieser Umlagerungsvorgang Energie und kann die Grundlage für die Energieschwelle. Ferner muss der Herstellungsprozess des Elements einen direkten elektrischen Zugang zu dem oder den Molekül(en) ermöglichen. Schließlich muss die Gestaltung der Molekülform und/oder der Herstellungsprozess des Elements ein ausreichendes freies Volumen im Element ermöglichen, sodass das Molekül sich umlagern kann, wenn es oxydiert oder reduziert wird.

[0048] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gelöst, indem eine Molekülklasse verwendet wird, die als [2]-Catenane bekannt ist. Eine schematische Darstellung, wie [2]-Catenane als Schalter verwendet werden können, ist in [Fig. 3](#) gezeigt, die symbolisch ein [2]-Catenan bedeuten soll. Catenane mit mehr als 2 Ringen können verwendet werden, falls ge-

wünscht. Die Verwendung von [2]-Catenanen ist jedoch bevorzugt. Ein solches [2]-Catenan hat einen molekularen Aufbau, der aus zwei ineinandergreifenden Ringen (31, 32) besteht. Einer der Ringe (32) hat zwei chemisch aktive Stellen (33, 34) von denen jede an den anderen Ring (31) binden kann, und daher ist das Catenan bistabil. Jedoch kann die Frage, welche der Bindungsstellen (33, 34) tatsächlich an den Ring (31) bindet, durch Oxydations-/Reduktionsvorgänge entschieden werden. Beispielsweise ist das Molekül wie hergestellt so ausgerichtet, dass die Stelle (33) auf dem Ring (32) eine starke Affinität zum Ring (31) hat. Daher werden die beiden Ringe so angeordnet sein, dass die Wechselwirkung maximal ist, wie in [Fig. 3](#) gezeigt. Wenn von der Stelle (33) auf dem Ring (32) ein Elektron entfernt wird, kann die Bindungspräferenz wechseln, sodass nun die Konfiguration mit der Stelle (34) im Ring (31) die niedrigste Energie hat. Einer der beiden Ringe (31, 32) muss sich drehen, um diese neue Konfiguration anzunehmen. Diese Umlagerung ist im molekularen Maßstab relativ groß und kann die Basis für eine Energieschwelle liefern, welche beide geometrischen Anordnungen voneinander trennt.

[0049] Eine bevorzugte beispielhafte Struktur des [2]-Catenans ist in [Fig. 4A](#) gezeigt. Die chemische Formel für dieses Molekülion ist $[C_{70}H_{76}N_4O_{10}S_4]^{4+}$. Typischerweise wird dieses Molekül als Salz hergestellt, wobei PF_6^- ein typisches Gegenion ist. In diesem Fall ist die Summenformel für die Molekülverbindung $C_{70}H_{76}F_{24}N_4O_{10}P_4S_4$. Dieses System besteht aus einem Ring (42) mit zwei Bipyridiniumeinheiten (45) und einen zweiten Kronenetherring (41) mit Biphenyl(43)- und Tetrathiolfulvalen(TTF)-Bausteinen (44) auf sich gegenüberliegenden Seiten des Rings. Diese beiden Bausteine (43, 44) sind die beiden Bindungsstellen des Rings (41), und sie können an die Bipyridiniumeinheiten (45) auf dem Ring (42) binden. Der Ring (42) ist positiv geladen und in diesem Fall wird Ladungsausgleich des Gesamtkomplexes durch Gegenionen, nämlich vier Hexafluorophosphinanonien (PF_6^-) (46) ermöglicht.

[0050] In [Fig. 4B](#) ist die Schaltwirkung dieses Moleküls gezeigt. Wenn das Molekül oxydiert ist, wird die TTF-Stelle (44) auf dem Ring (41) positiv geladen. Dadurch wird sie nun vom positiv geladenen Ring (42) abgestoßen und einer der Ringe (41, 42) rotiert, sodass nun die Biphenylstelle (43) des Rings (41) im Ring (42) ist. Diese Ringbewegung stellt eine Energieschwelle für die Redoxreaktion dar. Diese Schwelle zusammen mit der Bistabilität des Catenans sorgt für die Hysterese in der Strom-Spannungs-Kennlinie von Elementen, welche diese Molekülverbindung enthalten. Diese Schaltbewegung wurde bereits in der Lösungsphase demonstriert, jedoch nicht in einem Halbleiterelement. (A. Masumi et al., "A Chemically and Electrochemically Switchable [2]-Catenane Incorporating a Tetrathiafulvalene Unit," *Angew*

Chem. Int. Ed. 1998, 37, No. 3, pp. 333–337; V. Balzani et al., "The Switching of Pseudorotaxanes and Catenanes Incorporating a Tetrathiafulvalene Unit by Redox and Chemical Inputs," *Journal of Organic Chemistry* (im Druck)).

[0051] Die Fähigkeit des molekularen Schaltelements, einen flüchtigen oder einen nichtflüchtigen Speicher zu bilden, hängt von der Art der Elektroden ab. [Fig. 5A](#) ist eine schematische Darstellung des Energieniveaudiagramms eines flüchtigen molekularen Speichers; [Fig. 5B](#) ist das Energieniveaudiagramm eines nichtflüchtigen molekularen Speichers, bei dem der Schaltmechanismus auf der Oxydation des Moleküls beruht. Bei flüchtigen Element ([Fig. 5A](#)) liegt das Energieniveau des oxydierten Moleküls (**53**) bei der zentralen Spannung der Hystereseschleife, d.h. bei der Spannung, bei der der Zustand des Schalters gelesen wird. Die Breite der Hystereseschleife wird durch (**56**, **57**) bestimmt, welche mit der für die Umlagerung des Moleküls benötigten Aktivierungsenergie zusammenhängen. Das Energieniveau des oxydierten Moleküls (**53**) ist von den besetzten Energiezuständen der beiden Elektroden (**51**, **55**) durch Energie(Tunnel)schwellen (**52**, **54**) auf jeder Seite des Moleküls getrennt.

[0052] Der gesamte Energiebereich der Hystereseschleife (**56**, **57**) liegt bei höherer Energie als die Elektronenzustände einer jeden Elektrode (**51**, **55**), sodass die Hystereseschleife des Elements auf eine gewisse positive Spannung zentriert ist. Daher wird die Hystereseschleife durch Anlegen einer positiven Vorspannung (**58**) an die Elektrode (**51**) erreicht. Wenn diese Vorspannung weggenommen wird, fällt das Energieniveau der Elektrode (**51**) unter den unteren Abschnitt der Hystereseschleife (**57**) und der Zustand des Schalters geht verloren. Nur wenn die Elektrode (**51**) auf der Spannung (**58**) gehalten wird, kann der Schalter in seiner Stellung gehalten werden. Daher "verdampft" der Zustand des Speichers, wenn die Vorspannung (**58**) weggenommen wird.

[0053] Das Energieniveaudiagramm für einen nichtflüchtigen molekularen Schalter ist in [Fig. 5B](#) gezeigt. In diesem Fall sind die Energieniveaus der beiden Elektroden (**59**, **55**) nicht gleich, weil die Elektrode (**59**) nun aus einem anderen Material hergestellt ist. Dadurch wird dem Bereich zwischen den beiden Elektroden (**59**, **55**) ein statisches elektrisches Feld aufgeprägt und die Hystereseschleife (**56**, **57**) ist nun symmetrisch zur Energie der Elektrode (**59**). Daher werden positive Spannungen angewendet, um zum Abschnitt hoher Energie (**56**) der Hystereseschleife zu gelangen, und negative Spannungen werden angewendet, um den Abschnitt niedriger Energie (**57**) der Hystereseschleife zu erreichen. Wenn gar kein Feld angelegt ist, dann bleibt der Zustand des Speicherbits ungeändert und "verdampft" nicht.

[0054] Bistabile Halbleiterschalter wurden durch Inkorporieren des in [Fig. 4A](#) gezeigten [2]-Catenans in ein Element mit zwei Anschlüssen in Sandwichkonfiguration hergestellt. Auf einer Wasseroberfläche wurden dünnen Filme des [2]-Catenans als Langmuir-Monoschichten hergestellt und als Langmuir-Blodgett-Filme übertragen. Um die [2]-Catenane als Langmuir-Monoschichten herzustellen, mussten diese Molekülverbindungen amphiphil gemacht werden. Amphiphile bilden eine molekulare Monoschicht auf einer Luft/Wasser-Grenzfläche. Um die [2]-Catenane amphiphil zu machen, wurden die Hexafluorosphinanionen (**46**) durch den in [Fig. 6](#) gezeigten Kohlenwasserstoff ersetzt. Für solche substituierten Catenane wurde bereits gezeigt, dass sie Langmuir-Blodgett-Filme von hoher Qualität bilden (C. L. Brown et al., "The Introduction of [2]-Catenanes into Langmuir-Films and Langmuir-Blodgett Multilayers – A Possible Strategy for Molecular Information Storage Materials," *Langmuir* (im Druck)).

[0055] Das in [Fig. 6](#) gezeigte Gegenion ist ein bevorzugtes Gegenion. Hierfür geeignete Gegenionen müssen zwei Forderungen erfüllen. Erstens müssen sie die Ladung des [2]-Catenans ausgleichen, sodass ein ladungsneutraler Film hergestellt werden kann. Zweitens müssen sie amphiphil sein, sodass eine Langmuir-Monoschicht des Catenan/Gegenion-Komplexes gebildet werden kann. Spezifische Beispiele alternativer Gegenionen umfassen ohne Beschränkung amphiphile Carboxylatanionen, wie Anionen der Eicosansäure ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{CO}_2^-$), amphiphile Sulfatanionen wie ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18-20}\text{SO}_3^-$), andere amphiphile Phospholipidanionen ähnlich den hier verwendeten. Die Mengen der in der filmbildenden Lösung verwendeten Catenane und Gegenionen und auch die Trägerlösung selbst können verändert werden, um die gewünschte Bildung der Monoschicht aus Catenanmolekülen zu erreichen.

[0056] Die Bildung von Langmuir-Monoschichten aus amphiphilen Molekülen ist eine gut bekannte Technik. Siehe beispielsweise die Übersicht Knobler, CM; Schwartz, DK. "Langmuir and self-assembled monolayers," *Current Opinion In Colloid & Interface Science*, Band 4, p. 46–51, (1999). Die Herstellung von Langmuir-Monoschichten aus ionischen Molekülverbindungen kann oft weitere Schwierigkeiten einschließen. Beispielsweise hat bei einer ionischen Verbindung entweder das Kation oder das Anion eine gewisse charakteristische Wasserlöslichkeit und aus wasserlöslichen Komplexen kann man keine Langmuir-Monoschichten bilden. Typischerweise gestaltet man spezifisch oder verwendet man Kation- und Anionbausteine der Molekülverbindung, von denen keiner eine nennenswerte Wasserlöslichkeit aufweist. Solche nicht wasserlöslichen Bausteine aufzufinden ist nicht immer eine einfache Aufgabe. Man muss auch stabile Lösungen herstellen, die sowohl Kationen als auch Anionen enthalten und diese Lösungen

könnten keine Stabilität über lange Zeit haben. Zu den Parametern, welche die Herstellung eines guten Films ionischer Amphiphile steuern, gehören pH-Steuerung der Subphase, Ionenstärke der Subphase, Temperatur der Abscheidung und Überführung, Lösungsmittel für die Abscheidung und Überführungsgeschwindigkeiten.

[0057] Es wurden sowohl nichtflüchtige als auch flüchtige Elemente hergestellt. Vorschrift A wurde zur Herstellung eines Feldes aus flüchtigen Schaltelementen (als Typ V-Elemente bezeichnet) angewendet, während Vorschrift B ein Feld aus nichtflüchtigen Schaltelementen ergab (als Typ NV-Elemente bezeichnet).

Vorschrift A

[0058] Typ V-Elemente wurden nach dem in [Fig. 7](#) gezeigten Verfahren fabriziert. In Stufe 1 wurden 5 µm breite Metallelektroden (71) auf einer Siliziumdioxidsubstrat unter Anwendung von Standardverfahren der Lithographie und der Herstellung abgeschieden. Die Metallelektroden bestanden aus einer 0,5 µm dicken Titan-Basiselektrode, beschichtet mit 0,1 nm dickem Aluminium. In Stufe 2 wurde eine gleichmäßige Schicht des [2]-Catenans ([Fig. 4](#)) mit dem Gegenion ([Fig. 6](#)) als Langmuir-Blodgett-Film (72) abgeschieden.

[0059] Um eine Langmuir-Monoschicht von [2]-Catenanen mit /DMPA-Gegenion-Amphiphilen herzustellen, nehme man eine Lösung von 2,4 mmol/l des Natriumsalzes von DMPA in einer Mischung von Chloroform/Methanol 3:1. In einem anderen Kolben stelle man eine Lösung von 0,8 mmol/l des [2]-Catenans⁴⁺/4PF₆⁻-Komplexes in Acetonitril her. Man mische 0,5 ml der DPMA-Lösung mit 0,26 ml der [2]-Catenan-Vorratslösung, was ein Konzentrationsverhältnis DPMA:[2]-Catenan von 6:1 ergibt. Wenn diese beiden Lösungen gemischt werden, bildet sich mit der Zeit langsam ein Niederschlag. Um diesen Niederschlag zu vermeiden, muss man die Lösung unmittelbar nach der Herstellung verwenden. Mit einer Mikrospritze gebe man etwa 40 µl tropfenweise in einem Langmuir-Trog mit einer Oberfläche von 260 cm², der mit ultrareinem Wasser (18 MΩ) gefüllt ist. Man warte 30 min zum Äquilibrieren der Monoschicht/Subphase. Man komprimiere die Monoschicht mit einer Geschwindigkeit von 10 cm²/min bis zu einem Oberflächendruck von 1 mN/m. Dann komprimiere man die Monoschicht mit einer Geschwindigkeit von 5 cm²/min bis zu einem Oberflächendruck von 14 mN/m. Dann komprimiere man die Monoschicht mit einer Geschwindigkeit von 2 cm²/min bis ein Oberflächendruck von 30 mN/m erreicht ist. Dieser Oberflächendruck entspricht etwa einer Fläche von 87 Å² je [2]-Catenan. Man lasse die Monoschicht sich 30 min stabilisieren. Nun stelle man einen Langmuir-Blodgett-Film auf dem mit den Elektroden ge-

musterten Substrat unter Anwendung des Senkrecht-Transfervfahrens her. Das bedeutet, dass das gemusterte Substrat mit 1 mm/min unter konstantem Oberflächendruck durch die Luft-Wasser-Grenzfläche gehoben wird. Das gemessene Transfervverhältnis ist etwa 1,1.

[0060] In Stufe 3 wurde ein Decksatz aus Titanelektroden (73) (50 nm dick, 10 µm breit) senkrecht zum ersten Satz (71) abgeschieden. Für Titanmetall wurde bereits gezeigt, dass es Filme hoher Qualität bildet, wenn es auf organische Moleküle aufgedampft wird. In Stufe 4 wurden Aluminiumelektroden (74) direkt auf die in Stufe 3 abgeschiedenen Titanelektroden (73) abgeschieden. Die einzelnen Typ V-Elemente wurde angesprochen, indem zu einer der Aluminium-Deckelektroden (74) und zu einer der Titan-Basiselektroden (71) elektrische Kontakte hergestellt wurden.

[0061] Die resultierenden Elemente zeigten die charakteristische Hystereseschleife einer flüchtigen Speicherzelle und können entweder als Speicher- oder als Schaltelemente benutzt werden.

[0062] Der tatsächliche Betrieb eines Typ V-Elements ist in [Fig. 8](#) gezeigt. In diesem Beispiel liegt die Strom-Spannungs-Hystereseschleife (86, 87) auf der Seite hoher Spannung des 0-Spannung-0-Strom-Punkts (88). Deshalb wird der Schalter als flüchtig angesehen. Wenn das Typ V-Element bei einer gewissen hohen Spannung (83) (z.B. +1 V) eingeschrieben wird, ist der Schalter im Zustand "offen" oder "0". Diese Zustand kann bei einer gewissen Zwischenspannung (83 bis 84) (z.B. zwischen +0,65 und 0,85 V) gelesen werden. Wenn das Typ V-Element bei einer gewissen niedrigen Spannung (82) (z.B. 0 V) eingeschrieben wird, wird es in den Zustand "geschlossen" oder "1" gebracht. Dieser kann wiederum bei der gleichen Zwischenspannung (83 bis 84) gelesen werden. Das Verhältnis der Vorwärts(86)- und Rückwärts(87)-Hysteresekurven (81) wird gezeigt, und dieses Verhältnis ergibt den Spannungsbereich, in dem dieses spezielle Element brauchbar ist.

Verfahren B

[0063] Typ NV-Elemente sind nichtflüchtige Schalter und wurden ebenfalls nach dem in [Fig. 7](#) gezeigten Herstellungsverfahren fabriziert, außer dass nun das erste Elektrodenmuster (71) aus n-dotiertem polykristallinem Silizium bestand. Diese Elektroden wurden der Luft ausgesetzt, damit vor der Überführung der molekularen Langmuir-Blodgett-Monoschicht aus [2]-Catenanen (72) eine Passivierung der Polysiliziumoberfläche durch Sauerstoff erfolgen konnte. [Fig. 9](#) zeigt anstelle der Hystereseschleife das tatsächliche Pendeln eines dieser Schalter zwischen dem offenen und dem geschlossenen Zustand. Das NV-Element wurde bei +2 V in den Zu-

stand "offen" oder "0", bei -2 V in den Zustand "geschlossen" oder "1" versetzt und wurde bei $+0,1$ V gelesen. Weil die Basiselektrode (71) ein Halbleiter und die Deckelektrode (73, 74) ein Metall war, hatte dieses Element außer der Eigenschaft des molekularen Schalters ein eingebautes Diodenverhalten. Bei diesem Element war das Lesen "nichtzerstörend", was bedeutet, dass der Zustand des Schalters durch den physikalischen Vorgang der Sondierung des Zustands nicht verändert wird.

[0064] Andere beispielhafte Elemente können wie folgt hergestellt werden:

Die kritischen Bausteine des [2]-Catenans (Fig. 4A), die zum molekularen Schalten beitragen, sind die positiv geladenen Bipyridiniumeinheiten (45) auf einem Ring (42) und die Tetrathiafulvalengruppe (44) auf dem anderen Ring (41). Andere beispielhafte Elemente können erzeugt werden, wenn man andere geeignete Gruppen, die im [2]-Catenan enthalten sind, substituiert. Beispielsweise würde ein [2]-Catenan, bei dem die Biphenylgruppe (43) durch eine Phenylgruppe ersetzt ist, ebenfalls als schaltfähiges Catenan dienen. In diesem Fall ist die chemische Formel für das [2]-Catenankation $[C_{66}H_{74}N_4O_{10}S_4]^{4+}$. Beweise für das Schaltverhalten eines solchen Catenans wurden berichtet (V. Balzani, A. Credi, G. Mättersteig, O. A. Matthews, F. M. Raymo, J. F. Stoddart, M. Venturi, A. J. P. White, and D. J. Williams, "The switching of pseudorotaxanes and catenanes incorporating a tetrathiafulvalene unit by redox and chemical inputs," *Journal of Organic Chemistry* (im Druck, 1999)). Alternative [2]-Catenane umfassen jene, bei denen die Biphenylgruppe (43) durch fast jede andere chemische Gruppe, ausgenommen eine Tetrathiafulvaleneinheit, ersetzt ist. Andere chemische Gruppen können so etwas wie Ether- oder Alkylgruppen umfassen. Es sind auch [2]-Catenane zur Herstellung von Halbleiterschaltelementen oder mehrfach einstellbaren Speicherelementen brauchbar, bei denen der Ring (42), der die Bipyridiniumeinheiten (45) enthält, zur Verbindung dieser Einheiten Biphenyl, Alkyl oder eine Vielzahl anderer Gruppen anstelle der Phenylgruppe verwendet. Jedes der oben beschriebenen [2]-Catenane, bei dem das Gegenion (Fig. 6) durch andere amphiphile Gegenionen, wie die oben beschriebenen, ersetzt ist, funktioniert auch als Halbleiterschaltelement oder mehrfach einstellbares Speicherelement.

[0065] Die kritischen Elektrodenbauteile dieser molekularen Schaltelemente umfassen Elektroden mit angemessenen Fermi-Niveaus, sodass Flüchtigkeit oder Nichtfluchtigkeit des Schaltelements gesteuert werden kann. Elektroden aus p-dotiertem Silizium oder n- oder p-dotiertem Polysilizium wären ein geeigneter Ersatz für die Basiselektrode (59) aus n-dotiertem Polysilizium beim nichtflüchtigen Element. Verschiedene Metallelektroden, darunter Platin, Chrom und Aluminium, können ebenfalls als Basis-

oder Deckelektrode eingesetzt werden. In diesen Fällen müssten aber die Fermi-Niveaus dieser Elektroden in Betracht gezogen werden, um festzustellen, ob das molekulare Schalt/Speicherelement flüchtig oder nicht flüchtig sein würde oder nicht.

[0066] Nach der Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sollte der Fachmann bemerken, dass die angeführte Offenbarung nur beispielhaft ist und dass verschiedene andere Alternativen, Anpassungen und Abwandlungen im Bereich der vorliegenden Erfindung möglich sind. Demnach ist die vorliegende Erfindung nicht auf die obigen bevorzugten Ausführungsformen beschränkt, sondern nur durch die folgenden Ansprüche.

Patentansprüche

1. Molekulares Halbleiterschaltelement, umfassend

- ein erstes Anschlusselement,
- ein zweites Anschlusselement und
- bistabile Moleküle, die zwischen das erste und das zweite Anschlusselement sandwichartig eingelegt sind,

dadurch gekennzeichnet, dass die bistabilen Moleküle eine Monoschicht von [2]-Catenanmolekülen sind.

2. Molekulares Halbleiterschaltelement nach Anspruch 1, wobei das Schaltelement ein flüchtiges molekulares Schaltelement ist.

3. Molekulares Halbleiterschaltelement nach Anspruch 1, wobei das Schaltelement ein nichtflüchtiges molekulares Schaltelement ist.

4. Speicherzelle, Routingschaltung, NICHT-Glied oder programmierbarer Logikbaustein mit einem molekularen Halbleiterschaltelement nach Anspruch 2 oder 3.

5. Speicherzelle, Routingschaltung, NICHT-Glied oder programmierbarer Logikbaustein nach Anspruch 4, die ein Diodenverhalten zeigen.

6. Molekulares Halbleiterschaltelement nach Anspruch 1, wobei das [2]-Catenan $C_{70}H_{76}F_{24}N_4O_{10}P_4S_4$ ist.

7. Verfahren zur Herstellung eines molekularen Halbleiterschaltelements, dadurch gekennzeichnet, dass es einen Schritt der Bildung einer Monoschicht von [2]-Catenanmolekülen umfasst, die zwischen zwei Anschlusselemente sandwichartig eingelegt sind, wobei dieser Schritt der Monoschichtbildung den Schritt des Mischens einer ausreichenden Menge Gegenionen mit [2]-Catenanmolekülen umfasst, um eine filmbildende Mischung bereitzustellen, die elektrisch neutral und zur Verwendung bei der Bil-

derung der Monoschicht aus [2]-Catenanmolekülen geeignet ist.

8. Verfahren zur Herstellung eines molekularen Halbleiterschaltlements nach Anspruch 7, wobei das [2]-Catenan $C_{70}H_{76}F_{24}N_4O_{10}P_4S_4$ ist.

9. Verfahren zur Herstellung eines molekularen Halbleiterschaltlements nach Anspruch 7, wobei das Gegenion aus der Gruppe, die aus amphiphilen Sulfatanionen, amphiphilen Carboxylatanionen und amphiphilen Phospholipidanionen besteht, ausgewählt ist.

10. Verfahren zur Herstellung eines molekularen Halbleiterschaltlements nach Anspruch 8, wobei das Gegenion PF_6^- ist.

11. Molekulares Halbleiterschaltlement nach Anspruch 1, wobei die Monoschicht aus [2]-Catenanmolekülen nach dem Verfahren von Anspruch 7 hergestellt ist.

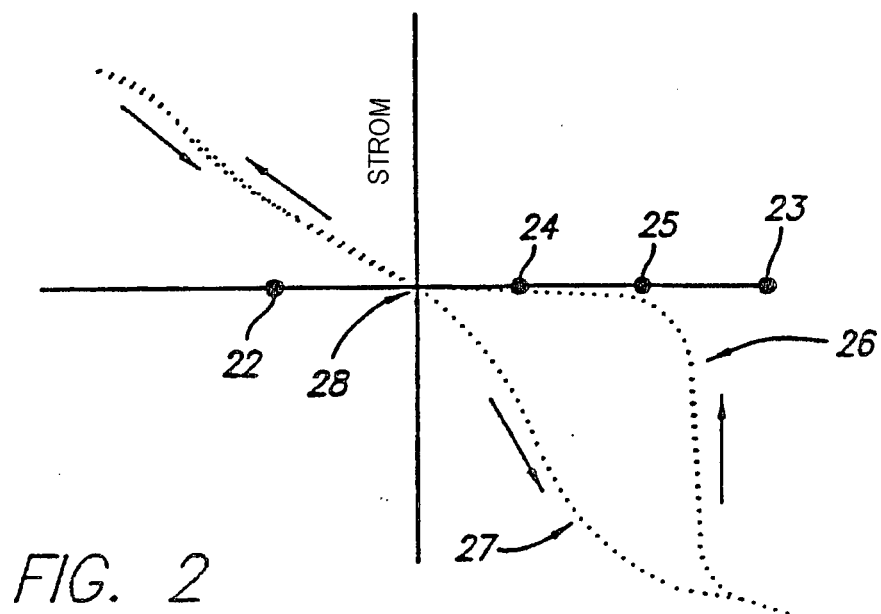
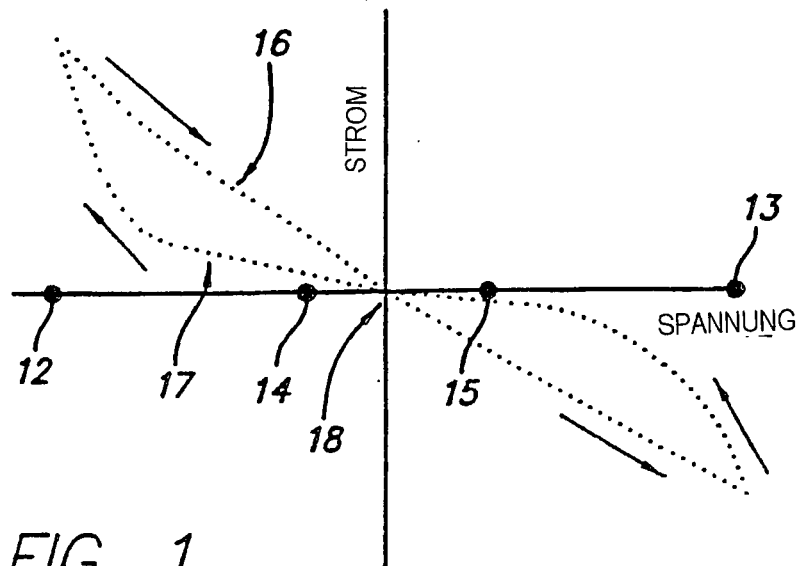
12. Molekulares Halbleiterschaltlement nach Anspruch 11, wobei das Schaltelement ein flüchtiges molekulares Schaltelement ist.

13. Molekulares Halbleiterschaltlement nach Anspruch 1, wobei das Schaltelement ein nichtflüchtiges molekulares Schaltelement ist.

14. Speicherzelle, Routingschaltung, NICHT-Glied oder programmierbarer Logikbaustein mit einem molekularen Halbleiterschaltlement nach Anspruch 12 oder 13.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



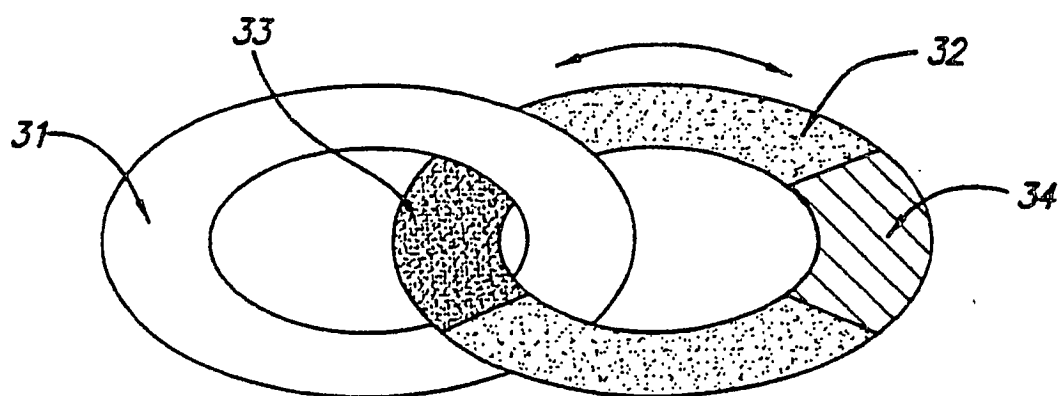


FIG. 3

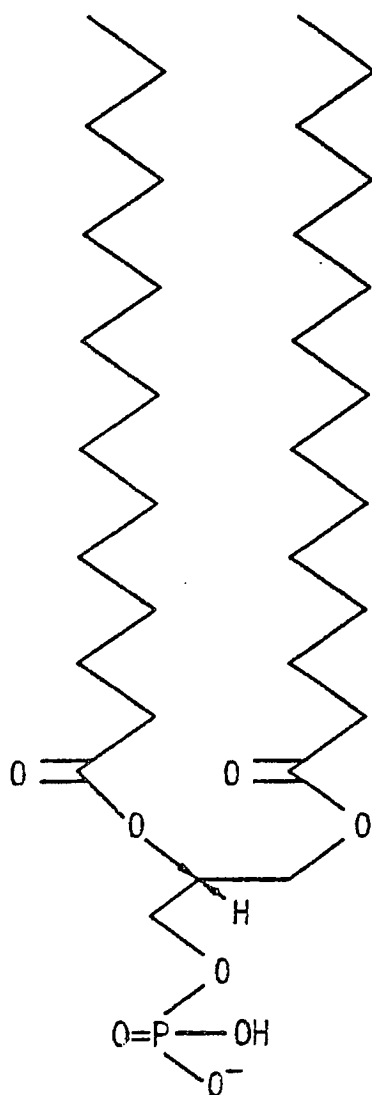
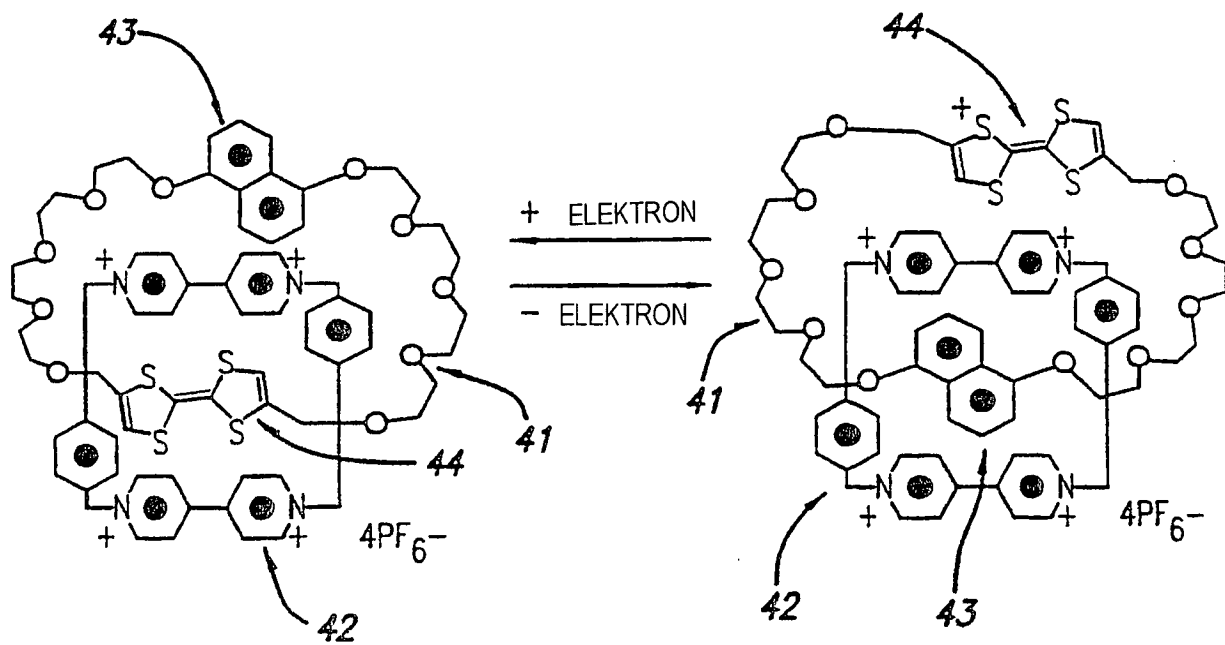
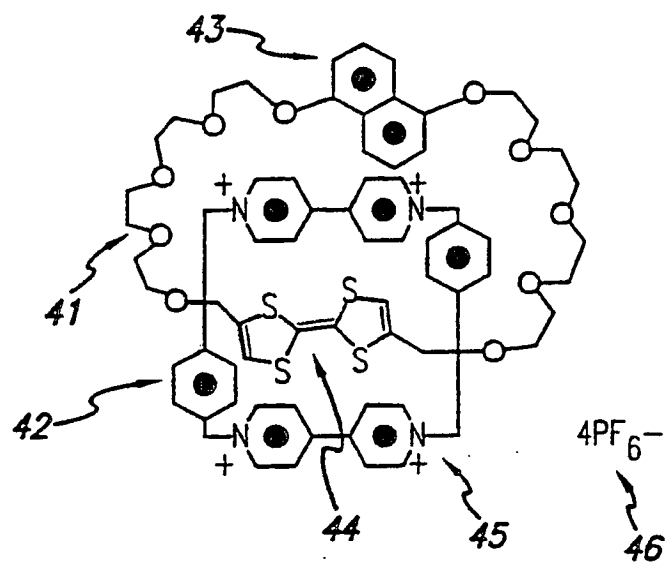


FIG. 6



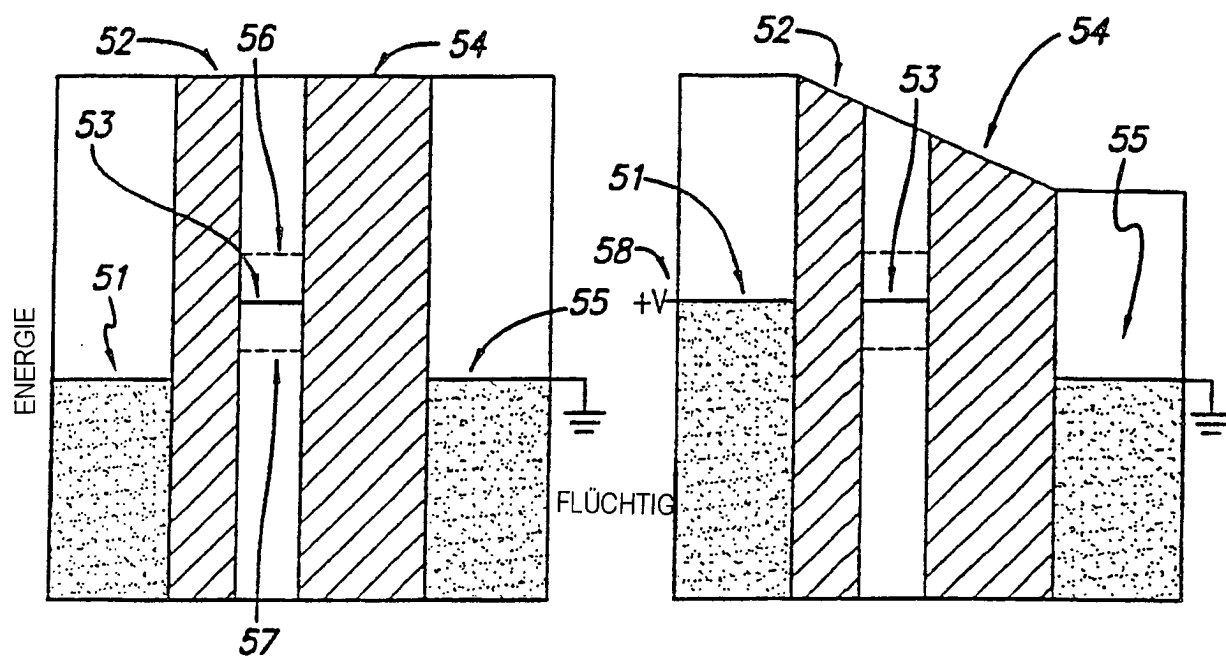


FIG. 5A

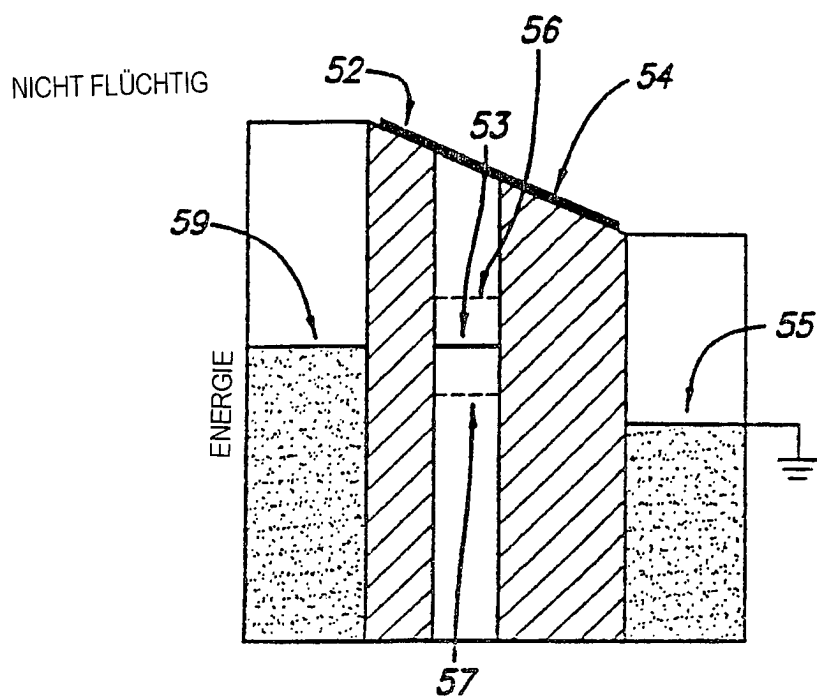


FIG. 5B

FIG. 7

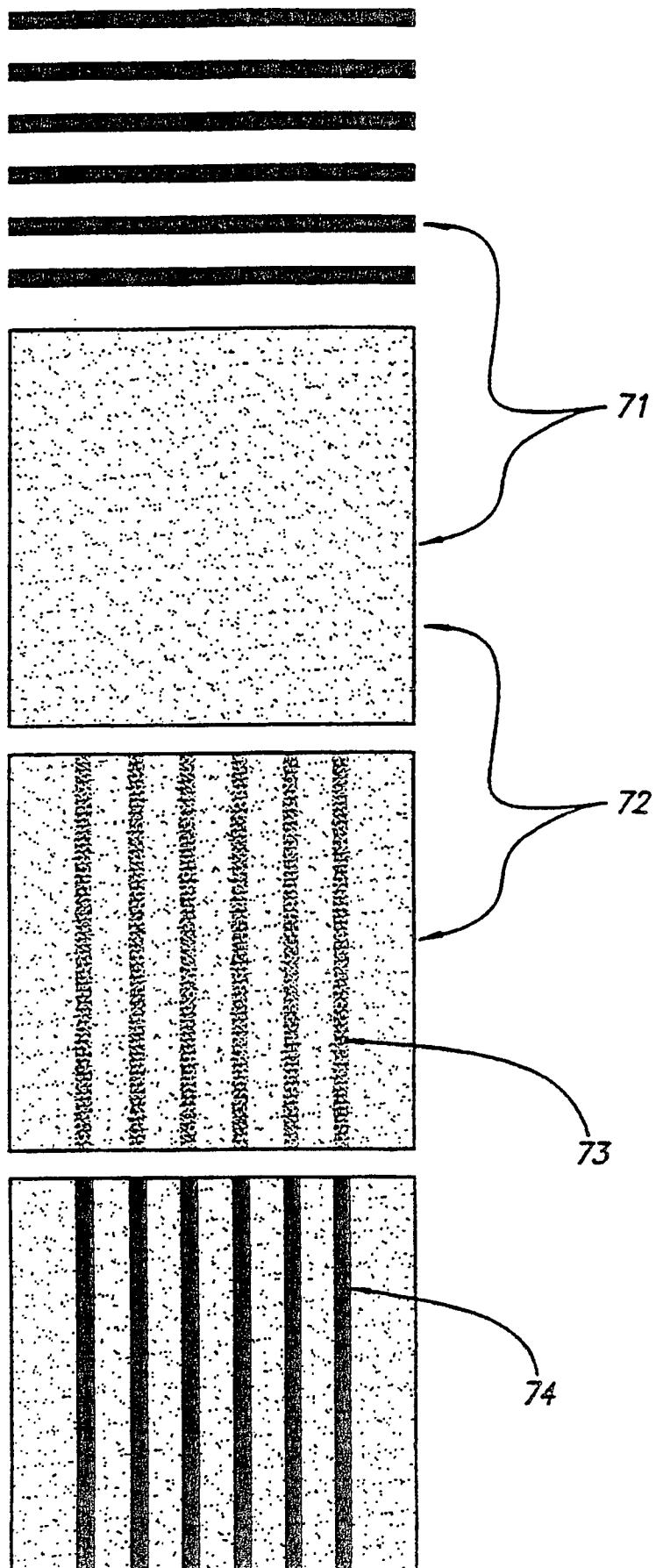


FIG. 8

