

(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 861/97

(51) Int.Cl.<sup>6</sup> : **G11C 16/02**

(22) Anmeldetag: 21. 5.1997

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 9.1998

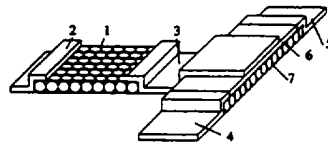
(45) Ausgabetag: 25. 5.1999

(73) Patentinhaber:

**WASSHUBER CHRISTOPH DIPL.ING. DR.  
A-1100 WIEN (AT).**

## (54) EIN-ELEKTRON SPEICHERBAUELEMENT

(57) Ein-Elektron Speicherbauelement bestehend aus zwei Knotenmatrizen (granularen Filmen) (1) und (7) die über eine Steuerelektrode (3) kapazitiv gekoppelt sind und deren Speicherinhalt durch das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein von Stromoszillationen in der Knotenmatrix (7) ausgelesen wird.



Integrierte Schaltungen wurden in den letzten zwanzig Jahren stetig kleiner, schneller und benötigen für ihren Betrieb immer weniger elektrische Leistung. Neben der Weiterentwicklung der etablierten CMOS-Technologie, die zunehmend an ihre Grenzen stößt, werden vermehrt neue Technologien und Bauelemente vorgeschlagen, um den Trend 'kleiner - schneller - leistungssärmer - billiger' auch in Zukunft ungebrochen weiterführen zu können. Besonders erfolgsversprechend sind sogenannte Ein-Elektron Bauelemente (single-electron devices). Eine Einführung in Ein-Elektron Bauelemente und deren Funktionsweise kann in dem Aufsatz 'Elektronik mit einzelnen Elektronen' von Konstantin Likharev und Tord Claeson in 'Spektrum der Wissenschaft' vom August 1992, Seite 62, gefunden werden.

Ein-Elektron Bauelemente und Schaltungen bestehen aus Knoten (elektrisch leitenden Bereichen, z.B. Metallstreifen oder -körnern) die von Tunnelübergängen (Potentialbarrieren, z.B. Oxydschichten) getrennt werden. Zusätzlich finden andere elektrische Bauelemente wie Kapazitäten, Widerstände und Spannungsquellen Verwendung. Knoten können nur durch das quantenmechanische Tunneln durch, oder einen thermisch aktivierten Übertritt über Tunnelübergänge umgeladen werden. Eine solche Umladung wird unter bestimmten Bedingungen, und insbesondere bei sehr kleinen Knoten und Tunnelübergängen, von der sogenannten Coulomb-Blockade unterdrückt. Mit Hilfe der Coulomb-Blockade und des quantenmechanischen Tunnelns können einzelne Elektronen gezielt transportiert werden. Daher kommt auch der Name 'Ein-Elektron'-Bauelement oder -Schaltung. Die Coulomb-Blockade ist der zentrale physikalische Effekt, der Ein-Elektron Bauelemente möglich macht.

Unterschiedliche Ein-Elektron Bauelemente wurden bereits vorgeschlagen und zum Teil auch schon experimentell verwirklicht (Transistoren, Speicher, Logik-Gatter, Elektron Pumpen, Elektrometer, ...). Ebenso wurden bereits eine Vielzahl an Herstellungsmethoden veröffentlicht. Siehe dazu auch die Patente WO 94/15340, EP 0 642 173 A1, EP 0 727 820 A1, EP 0 675 546 A2, EP 0 718 894 A2, EP 0 750 353 A2, WO 96/16448 und EP 0 649 174 A1.

Entscheidend für eine breite industrielle Umsetzung von Ein-Elektron Bauelementen ist ihre Funktionstüchtigkeit bei Raumtemperatur, ihre Herstellbarkeit mit kostengünstigen, erprobten und reproduzierbaren Methoden und ihre Robustheit gegenüber Herstellungstoleranzen und unvermeidbaren Verunreinigungen im verwendeten Material. Alle bisher veröffentlichten Ein-Elektron Bauelemente und Methoden zur Herstellung dieser, verletzen eine oder mehrere der zuvor erwähnten Bedingungen (Funktionstüchtigkeit bei Raumtemperatur, industrielle Massenfertigung, Produktionsfehlertoleranz), die für eine kommerzielle Umsetzung unentbehrlich sind.

Um eine Funktionstüchtigkeit bei Raumtemperatur zu gewährleisten sind Strukturen kleiner 10 nm notwendig. Großtechnische Fertigungsanlagen für integrierte Schaltungen mit derartig kleinen Strukturen sind noch nicht realisiert. Und Verunreinigungen bringen unkontrollierbare Ladungen ein, die das Ausmaß der Coulomb-Blockade verändern oder sogar vollständig unterdrücken können. Da die Coulomb-Blockade der grundlegende Effekt ist auf dem jedes Ein-Elektron Bauelement basiert, wird durch ihre Unterdrückung die Funktionstüchtigkeit von Ein-Elektron Bauelementen zerstört.

Die vorliegende Erfindung löst alle diese Probleme für ein digitales Speicherbauelement in einer einfachen Art und Weise. Die Nanometer Strukturgröße wird mit granularen Filmen, insbesondere mit granularen Metall- oder Halbleiterfilmen, erreicht, die bereits mit etablierten industriell eingesetzten Lithographieverfahren (optische Lithographie, Elektronstrahlolithographie) und natürlich auch mit zukünftigen Lithographieverfahren (X-ray, Ionenstrahl, Nahfeld, Rastertunnelmikroskop, ...) weiter strukturiert werden können. Das kleinste Element, mit dem eine Schaltung entworfen werden kann, ist also nicht mehr der einzelne Knoten oder der einzelne Tunnelübergang sondern eine Matrix von natürlich geformten Knoten und Tunnelübergängen. Einerseits erlauben granulare Filme Korngrößen bis hinunter zu 1 nm, wodurch die Coulomb-Blockade und damit die Funktionstüchtigkeit der Schaltung bei Raumtemperatur gewährleistet ist, andererseits braucht durch die Verwendung von ganzen Knotenmatrizen der einzelne Knoten und Tunnelübergang nicht mehr lithographisch aufgelöst werden. D.h. es können Lithographieverfahren verwendet werden, die eine Auflösung von einigen 10 nm bis hin zu einigen 100 nm aufweisen. Knotenmatrizen können also um einige Größenordnungen größere Abmessungen als individuelle Knoten haben. Dies gestattet eine industrielle Herstellung bereits mit heutigen Lithographiemethoden. Weiters wird durch die Verwendung von Knotenmatrizen ein Mittelungseffekt erreicht. Verunreinigungen, die einen Knoten oder einen kleinen Bereich der Knotenmatrix stören, müssen noch lange nicht die gesamte Knotenmatrix funktionsuntüchtig machen. Dadurch sind derartige Knotenmatrizen viel unempfindlicher gegenüber Verunreinigungen, Störstellen und Produktionsfehler.

Zusätzlich wird bei dem Speicherelement dieser Erfindung, wie weiter unten noch genauer erklärt, der Effekt der Coulomb-Oszillationen zum Auslesen der Speicherzelle ausgenutzt. Dieser Effekt ist insensitive zu Störladungen. Dadurch wird das Problem der unvermeidbaren Störstellen und Verunreinigungen weiters entschärft. Die Tatsache, daß bei dieser Erfindung ausschließlich Knotenmatrizen eingesetzt werden bewirkt,

wie bereits erwähnt, eine starke Resistenz gegen Produktionsfehler.

#### Bildbeschreibungen:

- 5 Fig. 1 zeigt eine dieser Erfindung gemäßen schematischen Darstellung des Speicherbauelementes (oder Speicherzelle). (1) und (7) sind Knotenmatrizen (granulare Filme). (6) ist eine nichtleitende Schicht, z.B. ein Oxyd. (3) ist die Steuerelektrode, die eine kapazitive Kopplung beider Knotenmatrizen bewirkt. (2), (4) und (5) sind die drei Anschlußelektroden der Speicherzelle.
- 10 Fig. 2 zeigt eine Ausführungsvariante der Speicherzelle von Fig. 1. Die Teile sind denen von Fig. 1 gleich, mit dem Unterschied, daß es keine Steuerelektrode (3) mehr gibt. Die beiden Knotenmatrizen überlappen sich gegenseitig und bewirken damit eine kapazitive Kopplung.
- Fig. 3 zeigt eine mögliche Blockanordnung der bitadressierbaren Speicherzellen. (10) ist eine Wortleitung, (11) ist eine + Bitleitung und (12) ist eine -Bitleitung.
- 15 Fig. 4 ist eine schematische Darstellung einer kleinen Knotenmatrix bestehend aus Knoten (8) und Tunnelübergängen (9). Die tatsächliche Anordnung der Knoten und Tunnelübergänge ist nicht entscheidend. Im allgemeinen wird es auch keine regelmäßige Knotenanordnung sein.
- Fig. 5 zeigt das elektrische Ersatzschaltbild eines Teiles der Knotenmatrix. (8) sind die Knoten und (9) ist das international verwendete Schaltsymbol eines Tunnelüberganges.
- 20 Fig. 6 ist ein elektrisches Ersatzschaltbild der erfindungsgemäßen Speicherzelle. Die tatsächlichen Verbindungen der Knoten in den Knotenmatrizen (1) und (7) sind willkürlich angenommen und haben auf die prinzipielle Funktionsweise der Speicherzelle keinen Einfluß. Entscheidend ist, daß zwei Knotenmatrizen kapazitiv gekoppelt sind. Weiters sind für die Funktionsweise unwichtige Streukapazitäten nicht gezeichnet.

#### 25 Beschreibung der Erfindung:

- Die vorliegende Erfindung ist ein bitadressierbares Ein-Elektron Speicherbauelement (Speicherzelle), bestehend aus zwei kapazitiv gekoppelten Knotenmatrizen (granularen Filmen) mit weiteren drei Anschlußelektroden, die das Schreiben und Lesen der Speicherzelle gestatten.
- 30 Ein negativer Spannungsimpuls auf Elektrode (2), bzw. ein kombinierter negativer Spannungsimpuls auf Elektrode (2) und ein positiver Spannungsimpuls auf den Elektroden (4) und (5), bewirkt, daß Elektronen durch die Knotenmatrix (1) tunneln und sich in der Steuerelektrode (3) Fig. 1, oder im Überlappungsbereich der Knotenmatrizen (1) und (7) Fig. 2, sammeln. Dies könnte dem Schreiben einer logischen '1' entsprechen. Wird die Polarität der Spannungen umgedreht dann werden Elektronen von der Steuerelektrode (3) Fig. 1 bzw. vom Überlappungsbereich der granularen Filme (1) und (7) abgesaugt. Dies könnte dann dem Schreiben einer logischen '0' entsprechen. Ist der Spannungsimpuls vorbei und haben alle Elektroden wieder Nullpotential angenommen, dann verbleibt eine gewisse Anzahl an Ladungsträger in der Steuerelektrode (3) oder im Überlappungsbereich der granularen Filme gespeichert. Die Anzahl kann von einem einzigen Ladungsträger (Elektron) bis hin zu vielen tausenden oder millionen von Ladungsträgern reichen.
- 40 Wieviele Ladungsträger tatsächlich gespeichert werden hängt einerseits von der Beschaffenheit der Knotenmatrizen (granularen Filmen) (1) und (7) und deren kapazitiver Kopplung, andererseits von der Höhe des Spannungsimpulses ab. Im allgemeinen wird man versuchen so wenig wie möglich Ladungsträger zu speichern, damit der Leistungsverbrauch möglichst gering ist und die Geschwindigkeit dieses Schreibvorganges möglichst hoch ist. Wiederum abhängig von der Beschaffenheit insbesondere der Knotenmatrix (1) ist die Lebensdauer der Ladungsträger auf der Steuerelektrode bzw. im Überlappungsbereich. Ladungsträger können nämlich thermisch aktiviert, oder durch den sogenannten Co-Tunneleffekt wieder durch die Knotenmatrix (1) aus dem Speicherbereich wegwandern. Dies kann zu einer Verfälschung der gespeicherten Information führen. Die Lebensdauer kann wenige Millisekunden bis hin zu Stunden, Tagen oder Jahren betragen. Dementsprechend kann man dann auch von einer nichtflüchtigen Speicherzelle (non-volatile memory) sprechen. Aber selbst bei relativ kurzer Lebensdauer kann eine Speicherzelle auf dem Prinzip der
- 50 'Dynamischen Speicher', wo in regelmäßigen Abständen der Inhalt der Speicherzelle aufgefrischt wird, hergestellt werden.
- Das Auslesen des Speicherinhaltes geschieht folgendermaßen. Es werden die gleichen Spannungsimpulse wie z.B. beim Schreiben einer logischen '0' angelegt. Zusätzlich wird eine Spannungsdifferenz zwischen der + Bitleitung (11) und der -Bitleitung (12) aufgebracht. D.h. in die Speicherzelle wird de facto eine logische '0' geschrieben. Gleichzeitig wird der Strom durch die Knotenmatrix (7) gemessen. Es können jetzt zwei Fälle unterschieden werden. Entweder befand sich vor dem Auslesen (Schreiben der logischen '0') bereits eine logische '0' in der Speicherzelle, oder es befand sich vor dem Auslesen (Schreiben der logischen '0')

eine logische '1' in der Speicherzelle. Abhängig davon wird der Strom durch die Knotenmatrix (7) unterschiedlich aussehen. Befand sich bereits eine logische '0' in der Speicherzelle, dann wird durch den neuerlichen Schreibvorgang die Ladung in der Steuerelektrode (3) oder im Überlappungsbereich im wesentlichen nicht geändert. Der Strom durch die Knotenmatrix (7) wird daher keine Oszillationen (sog. Coulomb-Oszillationen) zeigen. Befand sich jedoch eine logische '1' in der Speicherzelle, dann wird durch den Schreibvorgang einer logischen '0' der Ladungszustand der Steuerelektrode bzw. des Überlappungsbereiches verändert und es zeigen sich Oszillationen im Strom durch die Knotenmatrix (7). D.h. das Vorhandensein von Oszillationen im Strom durch den granularen Film (7) läßt erkennen, ob eine logische '0' oder eine logische '1' gespeichert war. Es handelt sich hier um ein zerstörendes Auslesen. Daher muß der Inhalt der Speicherzelle, sofern er sich durch den Lesevorgang geändert hat, durch einen neuerlichen Schreibvorgang wieder hergestellt werden.

Das Material, aus dem die Knotenmatrix besteht, ist beliebig. Die einzige Bedingung, die gestellt wird, ist, daß leitende Bereiche (Knoten) (8) von nicht oder sehr schlecht leitenden Bereichen (Tunnelübergängen) (9) getrennt sind. Die nicht oder schlecht leitenden Bereiche müssen so ausgeführt sein, daß das Tunneln von Ladungsträgern von einem Knoten zum anderen möglich ist. Eine Knotenmatrix kann z.B. aus Metallpartikeln, die in einem Oxyd eingebettet sind, bestehen. Oder aus Metallkörnern die zuerst gefertigt werden, dann mit einer isolierenden Schicht umgeben werden und danach auf ein Substrat aufgebracht werden. Ebenso kann die Knotenmatrix aus halbleitenden Schichten bestehen, z.B. Poly-Silizium. Es können aber auch organische Schichten sein.

Die Knotenmatrizen (granularen Filme) (1) und (7) können je nach technologischen Gegebenheiten relativ klein oder relativ groß sein. Insbesondere können sie zu eindimensionalen granularen Leitungen reduziert werden. Ultimativ ist eine Reduktion zu einem einzigen Knoten (Streifen, Korn, Atom) möglich.

#### Vorteile:

- Die Verwendung von natürlich geformten Knotenmatrizen (granularen Filmen) ermöglicht den Raumtemperaturbetrieb, da Knoten und Tunnelübergänge bis hin zu atomaren Dimensionen erzeugt werden können.
- Die Verwendung von Knotenmatrizen im Gegensatz zu einzelnen Knoten und Tunnelübergängen gestattet eine wesentlich erleichterte Herstellung, da die kleinsten künstlich zu erzeugenden Abmessungen um Größenordnungen größer sein können als die der einzelnen Knoten und Tunnelübergänge.
- Die Verwendung von Knotenmatrizen, die aus vielen Knoten und Tunnelübergängen bestehen, bewirkt einen Mittelungseffekt, der individuelle Störstellen, Verunreinigungen und Produktionsfehler sehr gut ausgleicht.
- Durch die Verwendung der Coulomb-Oszillationen zum Auslesen des Speicherinhaltes wird eine weitere Unempfindlichkeit gegenüber Störladungen erreicht.
- Im Gegensatz zu den Patenten EP 0642 173 A1 und EP 0 727 820 A1, wo sich in ein und derselben granularen Schicht die Stellen, in denen Ladungsträger gespeichert werden, und der Strompfad, der ein Auslesen ermöglicht, befinden, sind diese zwei fundamentalen Teile einer Speicherzelle in der vorliegenden Erfindung getrennt angeordnet. Dadurch können beide Teile, der zur Speicherung von Ladungsträger und der zum Auslesen des Speicherzustandes, getrennt optimiert werden. D.h. die Knotenmatrix (1), die Ladungsträger speichert, und die Knotenmatrix (7), die den Speicherzustand ausliest, können aus völlig unterschiedlichen Materialien hergestellt werden, oder unterschiedlichen Prozessschritten ausgesetzt werden.
- Bei richtiger Beschaffenheit des granularen Filmes (1) kann eine nicht flüchtige Speicherzelle realisiert werden. Der Film (1) sollte dafür im allgemeinen sehr hochohmig sein.

#### Patentansprüche

1. Ein-Elektron Speicherbauelement, **dadurch gekennzeichnet**, daß es aus zwei Knotenmatrizen (granularen Filmen) (1) und (7) besteht, die über eine Steuerelektrode (3) kapazitiv gekoppelt sind und deren Speicherinhalt durch das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein von Stromoszillationen in der Knotenmatrix (7) ausgelesen wird (Fig. 1).
2. Speicherbauelement nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die kapazitive Kopplung der beiden Knotenmatrizen (1) und (7) nicht durch eine eigene Steuerelektrode vorgenommen wird, sondern durch das Überlappen beider Knotenmatrizen bewirkt wird (Fig. 2).

## AT 405 109 B

3. Speicherbauelement nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine oder beide Knotenmatrizen durch eindimensionale Quantenleitungen ersetzt wurden.
4. Speicherbauelement nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine oder beide Knotenmatrizen durch einen einzelnen Knoten ersetzt wurden.

Hiezu 2 Blatt Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

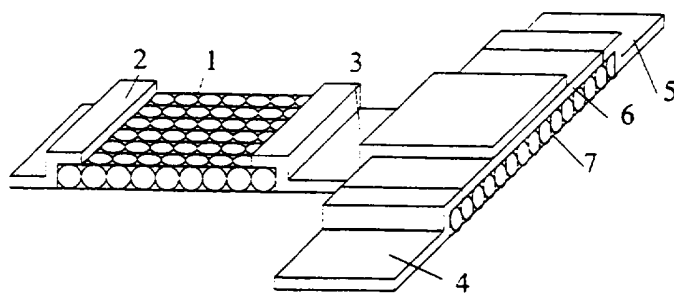


Fig. 1

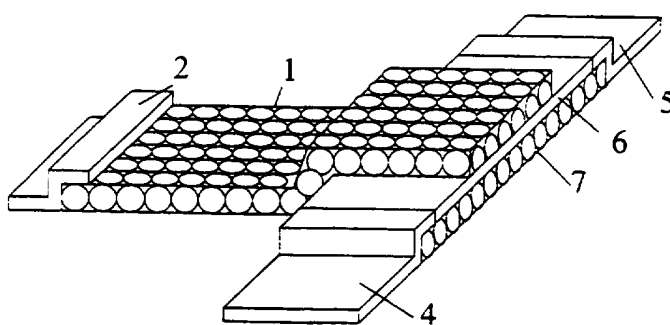


Fig. 2

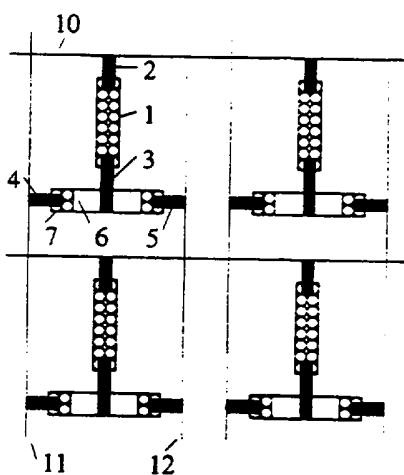


Fig. 3

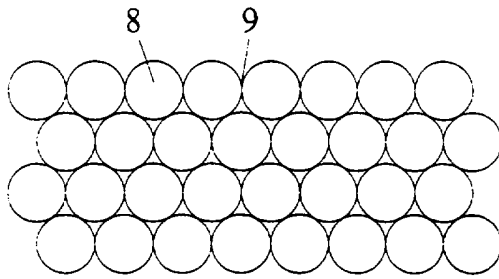


Fig. 4

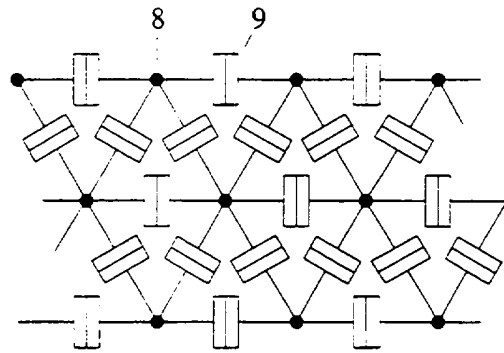


Fig. 5

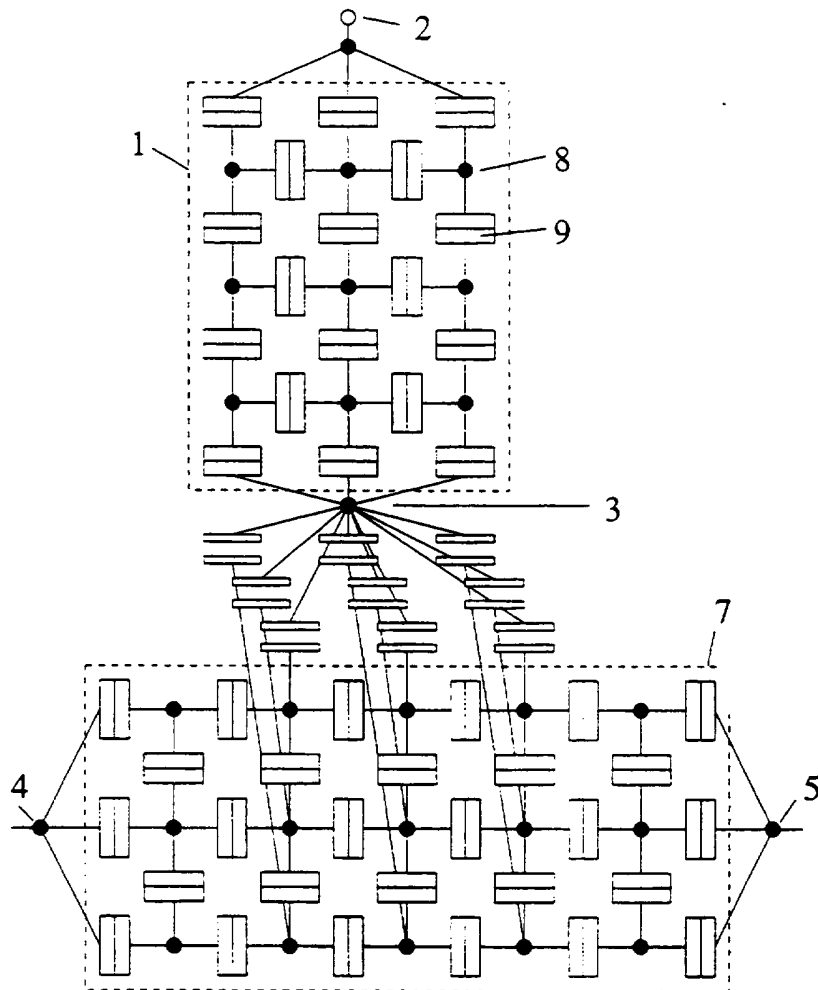


Fig. 6