(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2021 124 396 A1** 2023.03.23

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 124 396.3**
(22) Anmeldetag: **21.09.2021**
(43) Offenlegungstag: **23.03.2023**

(51) Int Cl.: ***H01J 3/40*** (2006.01)
H01J 1/312 (2006.01)
C04B 35/505 (2006.01)
G04F 5/14 (2006.01)
G01N 21/64 (2006.01)
G06N 10/00 (2022.01)
H10N 60/12 (2023.01)

(71) Anmelder:
Bundesrepublik Deutschland (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 38116 Braunschweig, DE

(74) Vertreter:
Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig, DE

(72) Erfinder:
Raupach, Sebastian, Dr., 38116 Braunschweig, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	**10 2018 121 942**	**B3**
DE	**10 2019 114 842**	**A1**
US	**6 710 334**	**B1**
US	**5 994 694**	**A**
WO	**2015/ 128 438**	**A1**

BOOTH, N. E.: Quasiparticle trapping and the quasiparticle multiplier. In: Applied Physics Letters (APL), Vol. 50, 1987, No. 5, S. 293-295. - ISSN 0003-6951 (P); 1077-3118 (E). DOI: 10.1063/1.98229. URL: https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.98229 [abgerufen am 2021-10-13]

Setzer, W. J. [u.a.]: Fluorescence detection of a trapped ion with a monolithically integrated single-photon-counting avalanche diode. In: arXiv:2105.01235v2 [quant-ph], 07.07.2021 (S. 1-6), DOI: 10.48550/arXiv.2105.01235

Slichter, D.H. [u.a.]: UV-sensitive superconducting nanowire single photon detectors for integration in an ion trap. In: Optics Express, Vol. 25, 2017, No. 8, S. 8705-8720, DOI: 10.1364/OE.25.008705

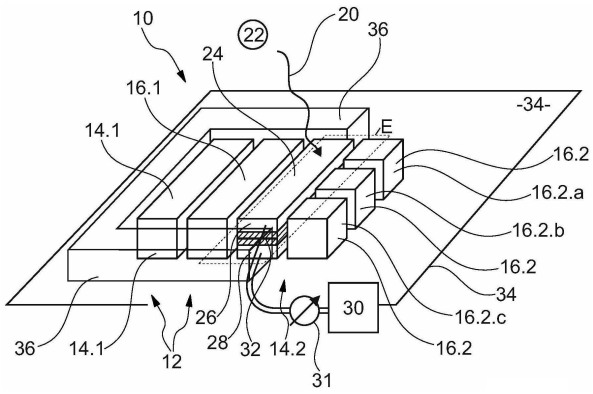
TODARO, S.L. [u.a.]: State readout of a trapped ion qubit using a trap-integrated superconducting photon detector. In: Physical Review Letters, Vol. 126, 2021, No. 1, Artikelnummer: 010501 (S. 1-7). ISSN 0031-9007 (P); 0031-9007 (E). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.010501. URL: https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.126.010501 [abgerufen am 06.10.2021]

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Ionen-Oberflächenfalle und Verfahren zum Betreiben einer Ionen-Oberflächenfalle**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Ionen-Oberflächenfalle (10) mit (a) einem Elektrodenpaar (12), das eine erste Fallen-Elektrode (14.1) und eine zweite Fallen-Elektrode (14.2) aufweist und das ausgebildet ist zum Bilden eines Fallenvolumens für zumindest ein Ion (22) beim Anlegen einer elektrischen Wechselspannung, (b) zumindest zwei Gleichspannungselektroden (16), die angeordnet sind zum Abschließen des Fallenvolumens und/oder Erzeugen eines elektrischen Felds, mittels dem eine Ionen-Position eines in der Ionen-Oberflächenfalle (10) gefangenem Ions (22) relativ zur Ionen-Oberflächenfalle (10) veränderbar ist, und (c) einem Sensor zum Erfassen von Photonen (20), die vom zumindest einen Ion (22) ausgesendet werden, wobei (d) der Sensor ein energiesensitiv messender Supraleiter-Sensor (18) ist, der eine Supraleiterschicht-Trennschichtschicht-Supraleiterschicht-Struktur hat und (e) mindestens die erste Supraleiterschicht (24, 28) die erste Fallen-Elektrode (14) bildet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Ionen-Oberflächenfalle mit (a) einem Elektrodenpaar, das eine erste Fallen-Elektrode und eine zweite Fallen-Elektrode aufweist und das ausgebildet ist zum Bilden eines Fallenvolumens für zumindest ein Ion beim Anlegen einer elektrischen Wechselspannung, (b) zumindest zwei Gleichspannungselektroden, die angeordnet sind zum Abschließen des Fallenvolumens und/oder Erzeugen eines elektrischen Felds, mittels dem eine Ionen-Position eines in der Ionen-Oberflächenfalle gefangen Ions relativ zur Ionen-Oberflächenfalle veränderbar ist, und (c) einem Sensor zum Erfassen von Photonen, die von zumindest einen Ion ausgesendet wurden.

[0002] Derartige Ionen-Oberflächenfallen werden dazu verwendet, ein Ion, zwei Ionen oder mehrere (also 3, 4, 5,..., N) Ionen in einem vorgegebenen Raumgebiet zu halten. Beispielsweise wird eine Ionen-Oberflächenfalle in einer Atomuhr oder einem Quantencomputer verwendet. Eine Atomuhr und/oder ein Quantencomputer mit einer erfindungsgemäßen Ionen-Oberflächenfalle sind ebenfalls Gegenstände dieser Erfindung.

[0003] Ionen-Oberflächenfallen werden häufig auf einem Chip realisiert. Zum Detektieren von Licht, das von dem Ion ausgesandt wird, werden spezielle Sensoren auf dem Chip angeordnet, wie beispielsweise im Artikel „State Readout of a Trapped Ion Qubit Using a Trap-Integrated Superconducting Photon Detector“ von Todaro et al., Phys. Rev. Lett. (2021) beschrieben ist.

[0004] Es hat sich als sehr aufwendig herausgestellt, beispielsweise Fluoreszenzstrahlung, die von dem Ion ausgesandt wird, zu detektieren.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das Detektieren von Photonen, die von dem gefangenen Ion ausgesandt werden, zu verbessern.

[0006] Die Erfindung löst das Problem durch eine gattungsgemäße Ionen-Oberflächenfalle, bei der der Sensor ein energiesensitiv messender Supraleiter-Sensor ist, der eine Supraleiterschicht-Trennschicht-Supraleiterschicht-Struktur hat und bei dem zumindest eine der Supraleiterschichten zumindest die erste Fallen-Elektrode und/oder Gleichspannungselektrode bildet.

[0007] Die Erfindung löst das Problem zudem durch ein Verfahren zum Betreiben einer solchen Ionen-Oberflächenfalle, das die folgenden Schritte aufweist: (i) Einbringen eines Ions in die Ionen-Oberflächenfalle, (ii) Anlegen einer Gleichspannung an die Gleichspannungselektroden, sodass das Ion in der Ionen-Oberflächenfalle gefangen bleibt, und (iii) Detektieren zumindest eines Photons, das vom Ion abgegeben wurde, mittels des Sensors.

[0008] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass vom Ion abgegebene Strahlung nur einen kurzen Weg zurücklegen muss, um vom Sensor erfasst zu werden und keine optischen Elemente wie optische Fenster, Linsen, Glasfasern etc. durchqueren muss. Die Wahrscheinlichkeit, auf dem Weg vom Ion zum Sensor absorbiert zu werden, ist daher gering.

[0009] Aufgrund der räumlichen Nähe des Sensors zum gefangenen Ion kann der Sensor zudem Photonen in einem vergleichsweise weiten Raumwinkelbereich detektieren. Durch den erfindungsgemäßen Aufbau kann der Sensor zudem eine vergleichsweise große räumliche Ausdehnung besitzen und so einen noch größeren Raumwinkelbereich abdecken, als wenn er auf den Raum zwischen den Elektroden beschränkt wäre.

[0010] Günstig ist zudem, dass die Erfindung in der Regel eine höhere Integrationsdichte erlaubt. Alternativ oder zusätzlich ergibt sich, insbesondere bei einer Reihenfertigung, eine vereinfachte Herstellung.

[0011] Die Erfindung basiert insbesondere auf der Idee, die aus dem Stand der Technik bekannte Trennung von Sensor und Fallen-Elektrode aufzuheben. In anderen Worten bildet zumindest eine Fallenelektrode einen Teil der Struktur, die der Detektion einzelner Photonen dient.

[0012] Zwischen den beiden Supraleiterschichten herrscht vorzugsweise eine konstante Potentialdifferenz. Das Potenzial der beiden Supraleiterschichten oszilliert jedoch vorzugsweise. Beispielsweise oszilliert das Potential gegenüber einem Nullpotential einer Spannungsquelle, die ausgebildet ist zum Anlegen einer gemeinsamen Spannung an beide Supraleiterschichten, mit einer Fallen-Frequenz, bei der es sich um eine Radiofrequenz handelt.

[0013] Wird - wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen - eine Gleichspannungselektrode verwendet, die aus zumindest zwei Teil-Elektroden besteht, kann zumindest eine dieser Teil-Elektroden als Sensor ausgebildet sein.

[0014] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einer Supraleiterschicht eine Schicht eines Materials verstanden, die bei einer Temperatur unterhalb einer Sprungtemperatur supraleitend wird. Vorzugsweise ist die Supraleiterschicht aus einem Hochtemperatur-Supraleiter aufgebaut. Günstig ist es, wenn der Hochtemperatur-Supraleiter eine Sprungtemperatur oberhalb von 77 Kelvin hat.

[0015] Unter dem Elektrodenpaar wird die Gesamtheit aus der ersten Fallen-Elektrode und der zweiten

Fallen-Elektrode verstanden. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass zumindest eine der Fallen-Elektroden aus 2, 3 oder mehr Teil-Elektroden aufgebaut ist. Es ist zudem möglich, nicht aber notwendig, dass einzelne Teil-Elektroden gegeneinander elektrisch isolierte sind. Alternativ sind die einzelnen Teil-Elektroden miteinander elektrisch kontaktiert, sodass sie auf dem gleichen Potenzial liegen.

[0016] Wird an das Elektrodenpaar die Fallen-Frequenz angelegt, bildet sich ein Fallenvolumen. Das Fallenvolumen ist derjenige Raumbereich, den das Ion nicht verlassen kann.

[0017] Unter den Gleichspannungselektroden werden solche Elektroden verstanden, mittels denen ein statisches elektrisches Einschlussfeld erzeugt werden kann. Das Einschlussfeld ist vorzugsweise so ausgebildet, dass das Fallenvolumen in alle Raumrichtungen geschlossen ist.

[0018] Günstig ist es, wenn eine Supraleiterschicht-Dicke der Supraleiterschicht zwischen 5 nm und 500 nm liegt.

[0019] Bei der Trennschicht handelt es sich um eine Schicht, die ihrerseits aus mehreren Teilschichten aufgebaut sein kann. Günstig ist es, wenn die Trennschicht eine Trennschicht-Dicke zwischen 1 nm und 100 nm hat.

[0020] Der Sensor ist so ausgebildet, dass dann, wenn ein Photon auf die erste Supraleiterschicht oder die zweite Supraleiterschicht trifft, Cooper-Paare getrennt werden und freie Elektronen entstehen, die durch die Trennschicht tunneln und einen Stromimpuls bewirken. Diese Stromimpuls kann detektiert und daraus die Energie des Photons berechnet werden.

[0021] Günstig ist es, wenn die Ionen-Oberflächenfalle auf einem Chip realisiert ist. Insbesondere sind das Elektrodenpaar, die Gleichspannungselektroden und der Sensor integrale Bestandteile des Chips. Die genannten Strukturen sind insbesondere durch sukzessives Abscheiden verschiedener Schichten aufeinander und/oder Herausätzen von Teilen der Schichtstruktur hergestellt.

[0022] Günstig ist es, wenn die Trennschicht eine Isolatorschicht ist, die zwischen den Supraleiterschichten angeordnet ist.

[0023] Vorzugsweise besitzt die Ionen-Oberflächenfalle eine Spannungsquelle, die so mit den Supraleiterschichten verbunden ist, dass zwischen den beiden Supraleiterschichten eine konstante Potentialdifferenz besteht.

[0024] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt die Ionen-Oberflächenfallen einen Tunnelstromänderungsdetektor zum, insbesondere quantitativen und/oder zeitaufgelösten, Detektieren einer Tunnelstromänderung eines Tunnelstroms von der ersten Supraleiterschicht durch die Trennschicht in die zweite Supraleiterschicht.

[0025] Vorzugsweise ist die Isolatorschicht so angeordnet, dass der Tunnelstromänderungsdetektor eine Tunnelstromänderung detektiert, wenn mindestens ein Photon auf eine der Supraleiterschichten oder die Trennschicht trifft.

[0026] Unter dem Tunnelstromänderungsdetektor wird ein Detektor verstanden, mit dem eine Änderung des Tunnelstroms detektierbar ist. Insbesondere ist ein Tunnelstrommessgerät, mittels dem der Tunnelstrom gemessen werden kann, gleichzeitig ein Tunnelstromänderungsdetektor.

[0027] Günstig ist es, wenn die Trennschicht eine oder mehrere kleinvolumige Sammel-Schichten aus einem - zusätzlich zu den äußeren supraleitenden Schichten des Sensors - weiteren supraleitenden Material aufweist, dessen Cooper-Paar-Bindungsenergie, und damit dessen Energielücke im Einzelelekktronenenergieschema in der Nähe der Fermikante, geringer ist als die des weiter außen liegenden supraleitenden Materials. Auf diese Weise können Quasiteilchen, die in der Sammelschicht in einen etwas niedrigeren Energiezustand übergegangen sind, nicht ohne Weiteres in den äußeren Supraleiter mit größerer Energielücke übergehen und dort abfließen, siehe N. E. Booth: „Quasiparticle trapping and the quasi particle multiplier“, Appl. Phys. Lett. 50, 293 (1987). Die Trennschicht ist damit vorzugsweise so aufgebaut, dass in die Trennschicht diffundierende Elektronen und/oder Quasiteilchen sich dort anreichern und eine Signalerhöhung des Supraleiter-Sensors bewirken, indem sie mehrfach für Tunnelprozesse durch die Trennschicht zur Verfügung stehen und so mehrfach zum Gesamtsignal beitragen.

[0028] Günstig ist es, wenn die Ionen-Oberflächenfalle ein Substrat besitzt, auf das die erste Fallen-Elektrode und die zweite Fallen-Elektrode, die erste Supraleiterschicht, die zweite Supraleiterschicht und die Trennschicht aufgebracht sind. Es sei darauf hingewiesen, dass darunter nicht zwingend verstanden wird, dass die entsprechende Struktur, wie beispielsweise die erste Fallen-Elektrode, direkt auf das Substrat aufgebracht ist. Es ist vielmehr auch möglich, dass eine der genannten Strukturen auf eine andere der genannten Strukturen aufgebracht wird, die ihrerseits mittelbar oder unmittelbar dem Substrat verbunden ist. Maßgeblich ist lediglich, dass die erste Fallen-Elektrode, die zweite Fallen-Elektrode, die erste Supraleiterschicht, die zweite Supraleiter-

schicht und die Trennschicht vorzugsweise eine einstückige Einheit mit dem Substrat bilden.

[0029] Bei dem Substrat kann es sich beispielsweise um einen Halbleiter, Quarzglas oder Korund handeln. Andere Substratmaterialien sind möglich.

[0030] Günstig ist es, wenn die zweite Supraleiterschicht elektrisch gegenüber der ersten Supraleiterschicht isoliert und potentialgetrennt ist. Unter dem Merkmal, dass die zwei Supraleiterschichten potentialgetrennt sind, wird insbesondere verstanden, dass diese gegeneinander isoliert und nicht miteinander kontaktiert sind. Es ist daher möglich, dass die beiden Supraleiterschichten auf unterschiedlichen elektrischen Potenzialen liegen. Das ist beispielsweise bei Nanodrähten anders, die vollständig auf einem Potenzial relativ zu einem Gegenelement liegen müssen, wobei das Gegenelement auf dem gleichen Potenzial wie eine der Fallen-Elektroden liegt.

[0031] Vorzugsweise ist die Spannungsquelle ausgebildet und kontaktiert zum Anlegen einer gemeinsamen Spannung an beide Supraleiterschichten. Die gemeinsame Spannung ist vorzugsweise eine Wechselspannung, wenn mindestens eine der Fallenelektroden als Photonen-Detektor ausgebildet ist. Die gemeinsame Spannung ist vorzugsweise eine Gleichspannung, wenn mindestens eine der Gleichspannungselektroden als Photonen-Detektor ausgebildet ist.

[0032] Vorzugsweise ist die Spannungsquelle so ausgebildet und mit den Supraleiterschichten verbunden, dass eine Potentialdifferenz zwischen beiden Supraleiterschichten zeitlich konstant ist. Hierunter wird insbesondere verstanden, dass eine Potentialdifferenz so klein ist, dass die Schwankung einen Unsicherheitsbeitrag von höchstens 50% zur Gesamtunsicherheit der Messung der Tunnelstromänderung leistet. Vorzugsweise schwankt die Potentialdifferenz um höchstens ein Prozent pro Sekunde.

[0033] Wenn die Spannungsquelle - wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen - eine Wechselspannungsquelle ist, besitzt sie vorzugsweise ein Hochpassfilter, an den eine oder mehrere Wechselspannungsquellen mit derselben Frequenz angeschlossen sind.

[0034] Die Ionen-Oberflächenfalle besitzt vorzugsweise einen Magnetfelderzeuger, der ein Magnetfeld in einer Trennschicht-Ebene der Trennschicht erzeugt. Insbesondere ist dadurch ein Hintergrund-Tunnelstrom unterdrückbar.

[0035] Sollen mehrere Ionen in der Ionen-Oberflächenfallen gefangen werden, was einen bevorzugten Ausführungsform darstellt, ist es vorteilhaft, wenn zumindest mit einer hinreichend hohen Wahrscheinlichkeit ermittelt werden kann, von welchem Ion ein Photon stammt, das vom Supraleiter-Sensor detektiert wird. Günstig ist es deshalb, wenn zumindest eine der Supraleitungsschichten zumindest zwei voneinander räumlich getrennte und gegeneinander elektrisch isolierte Detektionsabschnitte aufweist.

[0036] Günstig ist es, wenn die Detektionsabschnitte so mit dem Tunnelstromänderungsdetektor verbunden sind, dass ein Auftreffort des Photons ermittelbar ist. Unter dem Merkmal, dass der Auftreffort des Photons ermittelbar ist, wird insbesondere verstanden, dass mit einer Sicherheit von zumindest 75%, insbesondere zumindest 85%, beispielsweise zumindest 90%, ermittelt werden kann, von welchem Ion ein detektiertes Photon stammt.

[0037] Vorzugsweise besitzt die Ionen-Oberflächenfalle einen Verdampfer zum Erzeugen eines Gases aus Teilchen eines chemischen Reinstoffs, beispielsweise eines Metalls, insbesondere eines Alkalimetalls, und einen Photoionisator zum Ionisieren von Metallatomen, insbesondere Alkalimetallatomen, sodass daraus Ionen entstehen. Der Photoionisator besitzt vorzugsweise eine Elektrodenanordnung und eine Ansteuereinheit, die mit der Elektrodenanordnung so verbunden ist, dass die erzeugten Ionen einzelnen in die Ionen-Oberflächenfalle einbringbar sind.

[0038] Günstig ist es, wenn die Ionen-Oberflächenfalle eine Auswerteeinheit aufweist, die mit dem Tunnelstromänderungsdetektor verbunden ist. Die Auswerteeinheit ist vorzugsweise ausgebildet zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0039] Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens umfasst der Schritt des Einbringens eines Ions in die Ionen-Oberflächenfalle vorzugsweise die Schritte (i) Verdampfen eines Reinstoffs, beispielsweise von Metall, insbesondere eines Alkalimetalls, sodass ein Dampf entsteht, (ii) Photoionisieren des Dampfs, insbesondere von Metallatomen des Metalldampfs und (iii) Bewegen zumindest eines Ions des Dampfs in ein Fallenvolumen der Ionen-Oberflächenfalle.

[0040] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

> **Fig. 1** in der **Fig. 1a** eine schematische perspektivische Ansicht einer erfindungsgemäßen Ionen-Oberflächenfalle und in der **Fig. 1b** einen Querschnitt durch das elektrische Potenzial, das beim Anlegen des elektrischen Wechselfelds an das Elektrodenpaar entsteht. Die beiden Kreuze zeigen die Richtung der Achse der normalen Moden $n_{\perp}1$ und $n_{\perp}2$.

Fig. 2 zeigt in der **Fig. 2a** ein Schaltbild der Spannungsquelle, die mit den beiden Supraleitungsschichten verbunden ist, gemäß einer ersten Ausführungsform und in der **Fig. 2b** ein Schaltbild der Spannungsquelle, die mit den beiden Supraleitungsschichten verbunden ist, gemäß einer zweiten Ausführungsform.

[0041] Fig. 1a zeigt eine Ionen-Oberflächenfalle 10 mit einem Elektrodenpaar 12, das eine erste Fallen-Elektrode 14.1 und eine zweite Fallen-Elektrode 14.2 sowie umfasst. Die Ionen-Oberflächenfalle 10 besitzt zudem zwei Gleichspannungselektroden 16.1, 16.2.

[0042] Mittels eines Supraleiter-Sensors 18 kann ein schematisch eingezeichnetes Photon 20 detektiert werden, das von einem ebenfalls schematisch eingezeichneten Ion 22 ausgesendet wurde. Die Gleichspannungselektroden 16.1, 16.2 sind mit einer nicht eingezeichneten Positionier-Spannungsquelle verbunden, die ausgebildet ist zum Abgeben einer Spannung, sodass das Ion 22 an einer vorgegebenen Position P_{22} positioniert wird.

[0043] Der Supraleiter-Sensor 18 besitzt eine erste Supraleiterschicht 24, eine Trennschicht 26 und eine zweite Supraleiterschicht 28. Die erste Supraleiterschicht besteht beispielsweise aus Niob oder Tantal oder aus einem Hochtemperatursupraleiter, beispielsweise Yttriumbariumkupferoxid. Die Trennschicht 26 besteht vorzugsweise aus einem Isolator wie Aluminiumoxid und kann eine Sammelschicht beispielsweise aus als Aluminium aufweisen Die zweite Supraleiterschicht besteht vorzugsweise aus demselben Material wie die erste Supraleiterschicht.

[0044] Fig. 1a zeigt zudem eine Spannungsquelle 30, die mit den Supraleiterschichten 24, 26 verbunden ist. Die Spannungsquelle 30 beaufschlagt die erste Supraleiterschicht 24 mit einer ersten Wechselspannung $U_{W,24}$, die eine Fallen-Frequenz ft hat, und die zweite Supraleiterschicht 26 mit einer zweiten Wechselspannung $U_{w,26}$, die ebenfalls die Fallen-Frequenz ft hat. Eine Potentialdifferenz $\Delta U = | U_{W,24} - U_{W,26}|$ ist konstant und kleiner als die Energiebandlücke des verwendeten Supraleiters geteilt durch die Elementarladung. Im Fall von Niob ergibt sich daraus beispielsweise eine geeignete Spannung von ca. 1 mV.

[0045] Zwischen den beiden Supraleiterschichten 24, 26 und damit durch die Trennschicht 26 fließt ein Tunnelstrom I_{26}, der von einem Tunnelstromänderungsdetektor 31 erfasst wird.

[0046] Schematisch ist eingezeichnet, dass die Trennschicht 26 eine Sammel-Schicht 32 aufweisen kann, die im vorliegenden Fall aus Aluminium besteht. Die Sammel-Schicht 32 ist nicht separat kontaktiert, sondern weist eine Kontaktfläche zum Isolator und zur jeweiligen Supraleiterschicht auf.

[0047] Die Fallen-Elektroden 14.1, 14.2 und die Gleichspannungselektroden 16.1, 16.2 sind auf einem Substrat 34 angeordnet und beispielsweise durch sukzessiven Schichtaufbau und nachfolgendes Abätzen hergestellt.

[0048] Fig. 1a zeigt zudem schematisch einen Magnetfelderzeuger 36 in Form eines Magneten, der ein Magnetfeld in einer Trennschicht-Ebene E und parallel zu ihr erzeugt. Die Trennschicht 26 erstreckt sich entlang der Trennschicht-Ebene E. Das Magnetfeld dient dazu, die Amplitude von intrinsischen Hintergrundströmen zu unterdrücken, wie die des Josephson-Gleichstroms und geometrieabhängige Resonanzeffekte des Josephson-Wechselstroms, die in der Strom-Spannungs-Charakteristik zu spannungsabhängigen Spitzen des Gleichstroms führen (sog. „Fiske-Stufen“).

[0049] Fig. 1b zeigt einen Querschnitt durch das Fallenpotenzial φ, das beim Anlegen des elektrischen Wechselfelds an das Elektrodenpaar 12 entsteht. Das Kreuz zeigt die erwartete Position des Ions.

[0050] Fig. 1a zeigt, dass die Gleichspannungselektrode 16.2 aus, zwei, drei oder mehr, im vorliegenden Fall drei Teil-Elektroden 16.2.a, 16.2.b und 16.2.c, bestehen kann.

[0051] Fig. 2a zeigt die Schaltung der Spannungsquelle 30, die drei Teil-Spannungsquellen 38.1, 38.2, 38.3 aufweist. Die Teil-Spannungsquellen 38.1, 38.3 geben jeweils konstante Spannungen U_1, U_2 ab. Die Teil-Spannungsquelle 38.2 gibt eine reine Wechselspannung U_3 = Uw mit der Fallen-Frequenz ft ab. Die Spannungen beziehen sich jeweils auf das Potenzial des Substrats 34.

[0052] Fig. 2b zeigt die Schaltung, wenn die zweite Supraleiterschicht 24 aus n (hier: n = 2) Teil-Elektroden 14.1, 14.2 aufgebaut ist. In diesem Fall existieren n Tunnelstromänderungsdetektor einem 30.1, 30.2, die jeweils eine der Teil-Elektrode 14.1, 14.2 kontaktieren. Jede Teil-Elektrode ist ein Detektionsabschnitt.

[0053] Die Spannungsquelle 30 besitzt n Teil-Spannungsquellen zum Abgeben einer jeweils gleichen Gleichspannung $U_1 = U_2 = U_g$ und eine Teil-Spannungsquelle zum Abgeben der Wechselspannung U_4 = Uw mit der Fallen-Frequenz ft der Gleichspannung.

[0054] Trifft das schematisch eingezeichnete Photon 20 beispielsweise auf die erste Teil-Elektrode 14.1, so bewirkt dies eine Änderung des Tunnelst-

roms I_{26} von der ersten Teil-Elektrode 14.1 zur zweiten Supraleitungsschicht 28. Der Tunnelstromänderungsdetektor 31 besitzt vorzugsweise n Teil-Tunnelstromänderungsdetektoren, hier: die Teil-Tunnelstromänderungsdetektoren 31.1, 31.2. Die Änderung des Tunnelstroms von der ersten Teil-Elektrode 14.1 zur zweiten Supraleiterschicht 28 wird vom ersten Teil-Tunnelstromänderungsdetektor 31.1 erfasst.

[0055] Die Änderung des Tunnelstroms wird von einer schematisch eingezeichneten Auswerteeinheit 38, die mit dem Tunnelstromänderungsdetektor 31 verbunden ist, erfasst, die aus dem Tunnelstrom I_{26} die Energie des Photons 20 berechnet und den Zeitpunkt der Detektion registriert.

Bezugszeichenliste

10	Ionen-Oberflächenfalle
12	Elektrodenpaar
14	Fallen-Elektrode
16	Gleichspannungselektrode
18	Supraleiter-Sensor
20	Photon
22	Ion
24	erste Supraleiterschicht
26	Trennschicht
28	zweite Supraleiterschicht
30	Spannungsquelle
31	Tunnelstromänderungsdetektor
32	Sammel-Schicht
34	Substrat
36	Magnetfelderzeuger
38	Auswerteeinheit
ΔU	Potentialdifferenz
ft	Fallen-Frequenz
E	Trennschicht-Ebene
U_g	Gleichspannung
U_w	Wechselspannung

Patentansprüche

1. Ionen-Oberflächenfalle (10) mit
(a) einem Elektrodenpaar (12), das eine erste Fallen-Elektrode (14.1) und eine zweite Fallen-Elektrode (14.2) aufweist und das ausgebildet ist zum Bilden eines Fallenvolumens für zumindest ein Ion (22) beim Anlegen einer elektrischen Wechselspannung,
(b) zumindest zwei Gleichspannungselektroden (16), die angeordnet sind zum Abschließen des Fallenvolumens und/oder Erzeugen eines elektrischen Felds, mittels dem eine Ionen-Position eines in der Ionen-Oberflächenfalle (10) gefangenem Ions (22) relativ zur Ionen-Oberflächenfalle (10) veränderbar ist, und
(c) einem Sensor zum Erfassen von Photonen (20), die vom zumindest einen Ion (22) ausgesendet werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass
(d) der Sensor ein energiesensitiv messender Supraleiter-Sensor (18) ist, der eine Supraleiterschicht-Trennschichtschicht-Supraleiterschicht-Struktur hat und
(e) mindestens die erste Supraleiterschicht (24, 28) die erste Fallen-Elektrode (14) bildet.

2. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass
(a) die Trennschicht (26) eine Isolatorschicht ist, die zwischen den Supraleiterschichten (24, 28) angeordnet ist,
(b) eine Spannungsquelle (30), die so mit den Supraleiterschichten (24,28) verbunden ist, dass sich eine konstante Potentialdifferenz (ΔU) zwischen den Supraleiterschichten (24, 28) ergibt,
(c) die Ionen-Oberflächenfalle (10) einen Tunnelstromänderungsdetektor (31) zum Detektieren einer Tunnelstromänderung eines Tunnelstroms (I_{26}) durch die Trennschicht (26) aufweist und
(d) die Isolatorschicht so angeordnet ist, dass der Tunnelstromänderungsdetektor (31) eine Tunnelstromänderung detektiert, wenn ein Photon (20) auf eine der Supraleiterschichten (24, 28) oder die Isolatorschicht trifft.

3. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass
(a) die Trennschicht (26) eine oder mehrere normalleitende Sammel-Schichten (32) aufweist und
(b) die Trennschicht (26) so aufgebaut ist, das in die Trennschicht (26) diffundierende Elektronen sich dort anreichern und eine Signalerhöhung des Supraleiter-Sensors (18) bewirken.

4. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch**
(a) ein Substrat (34), auf das die erste Fallen-Elektrode (14.1) und die zweite Fallen-Elektrode (14.2), die erste Supraleiterschicht (24), die zweite Supraleiterschicht (28) und die Trennschicht (26) aufgebracht sind,
(b) wobei die zweite Supraleiterschicht (28) elektrisch gegenüber der ersten Supraleiterschicht (24) isoliert und potentialgetrennt ist und
(c) wobei die zweite Fallen-Elektrode (14.2) gegenüber der ersten Fallen-Elektrode (14.1) isoliert und potentialgetrennt ist.

5. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeich-**

net, dass die Spannungsquelle (30) ausgebildet ist zum Anlegen einer gemeinsamen Wechselspannung (Uw) an beide Supraleiterschichten (24, 28).

6. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** einen Magnetfelderzeuger (36), der ein Magnetfeld in einer Trennschicht-Ebene (E) der Trennschicht (26) erzeugt, sodass ein Hintergrund-Tunnelstrom unterdrückbar ist.

7. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
(a) zumindest eine der Supraleitungsschichten (24, 28) zumindest zwei voneinander räumlich getrennte und gegeneinander elektrisch isolierte Detektionsabschnitte (14.1, 14.2) aufweist und dass
(b) die Detektionsabschnitte (14.1, 14.2) so mit dem Tunnelstromänderungsdetektor (31) verbunden sind, dass ein Auftreffort des Photons (20) ermittelbar ist.

8. Ionen-Oberflächenfalle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Auswerteeinheit (38), die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 9 oder 10.

9. Verfahren zum Betreiben einer Ionen-Oberflächenfalle (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Schritte:
(i) Einbringen eines Ions (22) in die Ionen-Oberflächenfalle (10),
(ii) Anlegen einer Gleichspannung an die Gleichspannungselektroden (16), sodass das Ion (22) in der Ionen-Oberflächenfalle (10) gefangen bleibt, und
(iii) Detektieren zumindest eines Photons (20), das vom Ion (22) abgegeben wurde, mittels des Supraleiter-Sensors (18).

10. Verfahren zum Betreiben einer Ionen-Oberflächenfalle (10) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schritt des Einbringen eines Ions (22) in die Ionen-Oberflächenfalle (10) die folgenden Schritte umfasst:
(i) Verdampfen eines Reinstoffs, sodass ein Dampf entsteht,
(ii) Photoionisieren des Dampfs und
(iii) Bewegen zumindest eines Ions (22) des Dampfs in ein Fallenvolumen der Ionen-Oberflächenfalle (10).

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

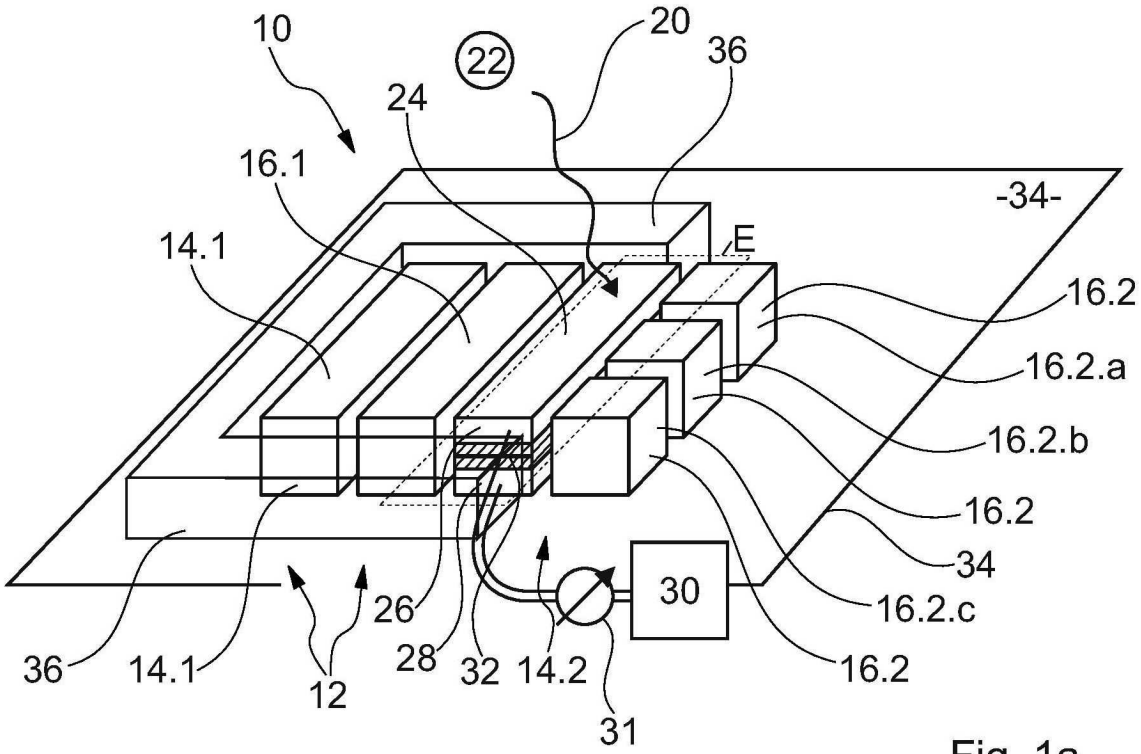


Fig. 1a

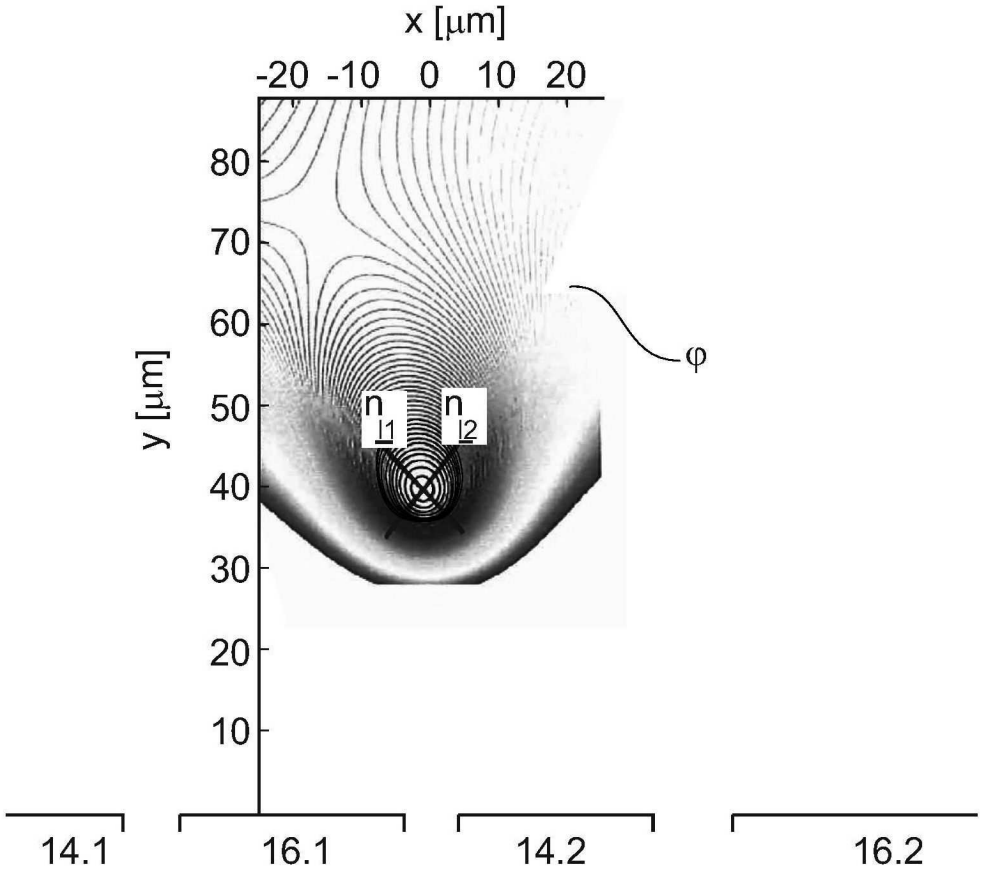


Fig. 1b

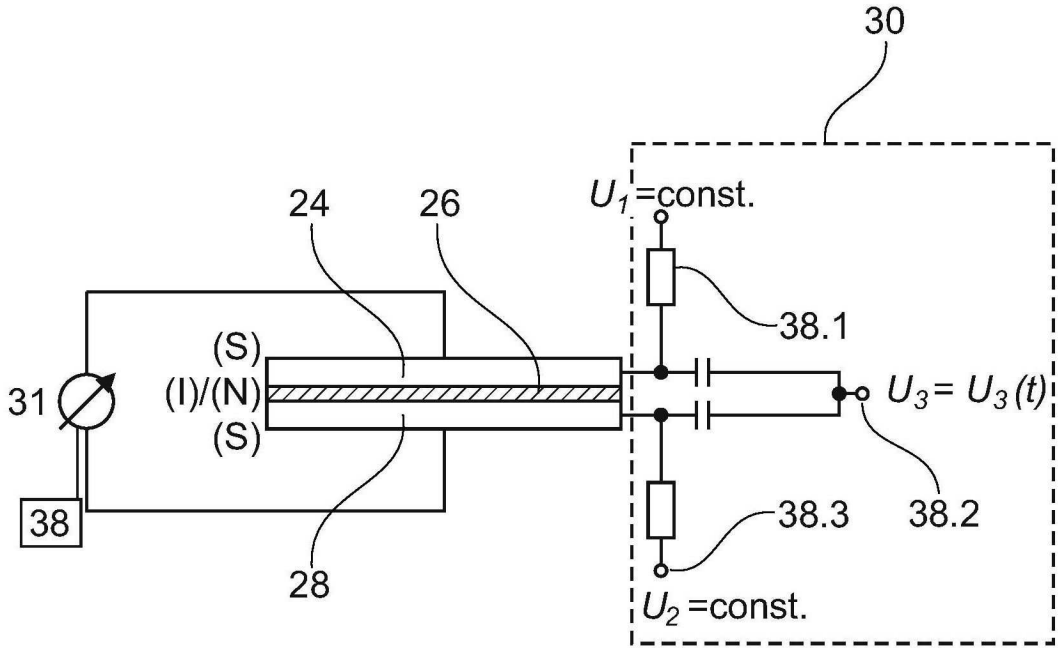


Fig. 2a

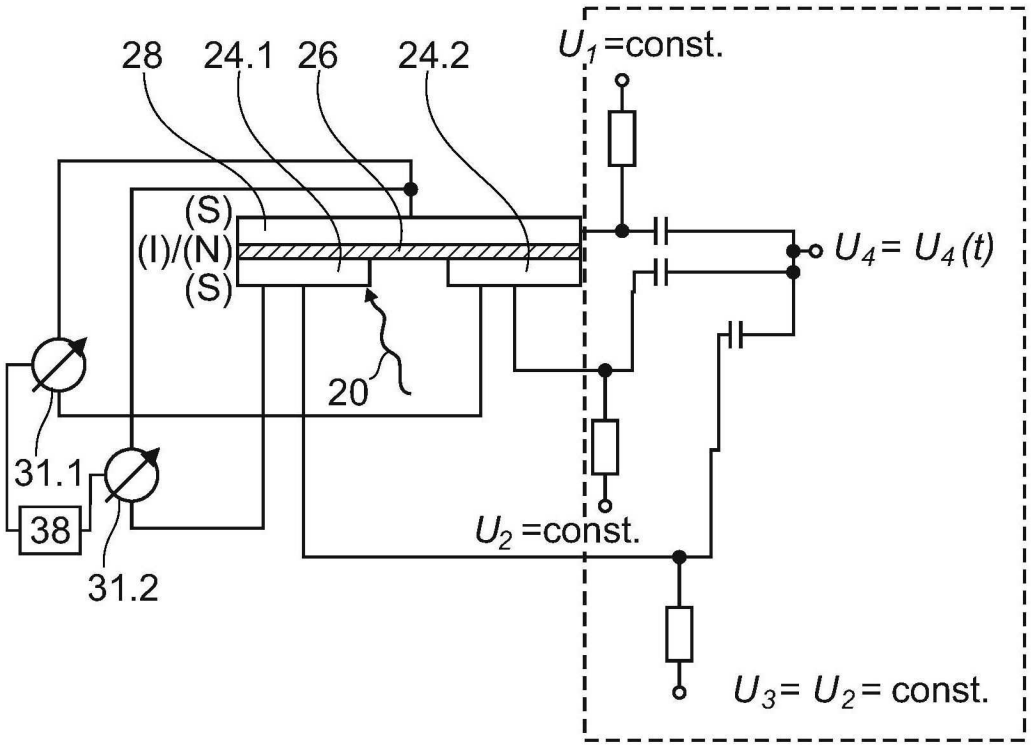


Fig. 2b

 Das Dokument wurde durch die Firma Luminess hergestellt.