



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 12 967 T2 2007.03.01**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 395 947 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G06N 1/00 (2006.01)**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 12 967.2**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/CA02/00787**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 732 272.6**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2002/097725**

(86) PCT-Anmeldetag: **29.05.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **05.12.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **10.03.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **05.07.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **01.03.2007**

(30) Unionspriorität:

872495 01.06.2001 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

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

(73) Patentinhaber:

**D-Wave Systems, Inc., Burnaby, British Columbia,
CA**

(72) Erfinder:

**AMIN, H., Mohammad, Vancouver, British
Columbia V6H 1M7, CA; ROSE, Geordie,
Vancouver, British Columbia V6J 3R3, CA;
ZAGOSKIN, Alexandre, Vancouver, British
Columbia V6J 1W4, CA; HILTON, P., Jeremy,
Vancouver, British Columbia V6J 4v7, CA**

(74) Vertreter:

derzeit kein Vertreter bestellt

(54) Bezeichnung: **QUANTENVERARBEITUNGSSYSTEM FÜR EINEN SUPRALEITENDEN PHASE QUBIT**

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

Gebiet der Erfindung

[0001] Diese Erfindung bezieht sich auf das Quantenrechnen und insbesondere auf ein Kontrollsystem zum Ausführen von Operationen an einem Quanten-Qubit.

Beschreibung des Standes der Technik

[0002] Die Forschung über das, was jetzt Quantenrechnen genannt wird, geht zurück auf Richard Feynman, siehe z. B. R. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.*, 21, 467–488 (1982). Feynman merkte an, dass Quantensysteme mit klassischen Computern (d. h. mit herkömmlichen Nicht-Quanten-Computern) inhärent schwierig zu simulieren sind, dass diese Aufgabe aber durch Beobachtung der Entwicklung eines weiteren Quantensystems gelöst werden könnte. Insbesondere umfasst die Lösung einer Theorie für das Verhalten eines Quantensystems üblicherweise das Lösen einer Differentialgleichung, die sich auf den Hamilton-Operator des Quantensystems bezieht. Die Beobachtung des Verhaltens des Quantensystems liefert Informationen hinsichtlich der Lösungen für die Gleichung.

[0003] Weitere Bemühungen beim Quantenrechnen konzentrierten sich anfangs auf die "Software-Entwicklung" oder auf den Aufbau der formalen Theorie des Quantenrechnens. Die Software-Entwicklung für das Quantenrechnen umfasst den Versuch, den Hamilton-Operator eines Quantensystems so einzustellen, dass er einem Problem entspricht, das eine Lösung erfordert. Meilensteine bei diesen Bemühungen waren die Entdeckungen der Shor-Grover-Algorithmen. Siehe z. B. P. Shor, *SIAM J. of Comput.*, 26:5, 1484–1509 (1997); L. Grover, *Proc. 28th STOC*, 212–219 (1996); und A. Kitaev, LANL-Vorabdruck quant-ph/9511026 (1995). Insbesondere ermöglicht der Shor-Algorithmus, dass ein Quantencomputer große Zahlen effektiv faktorisiert. In dieser Anwendung könnte ein Quantencomputer alle vorhandenen Verschlüsselungsschemata "öffentlicher Schlüssel" überholt machen. In einer weiteren Anwendung könnten Quantencomputer (oder sogar eine kleinere Vorrichtung wie etwa ein Quantenzwischenregenerator) absolut sichere Kommunikationskanäle ermöglichen, wo eine Nachricht nicht abgefangen werden kann, ohne in dem Prozess zerstört zu werden. Siehe z. B. H. J. Briegel, W. Dur, J. I. Cirac, P. Zoller, LANL-Vorabdruck quant-ph/9803056 (1998).

[0004] Dass gezeigt wurde, dass ein fehlertolerantes Quantenrechnen theoretisch möglich ist, öffnete den Weg für Versuche mit praktischen Realisierungen von Quantencomputern. Siehe z. B. E. Knill, R. Laflamme und W. Zurek, *Science*, 279, S. 342 (1998). Eine vorgeschlagene Anwendung eines

Quantencomputers ist das Faktorisieren großer Zahlen. In einer solchen Anwendung könnte ein Quantencomputer alle vorhandenen Verschlüsselungsschemata, die das Verfahren "öffentlicher Schlüssel" verwenden, überholt machen. In einer weiteren Anwendung könnten Quantencomputer (oder sogar eine kleinere Vorrichtung wie etwa ein Quantenzwischenregenerator) absolut sichere Kommunikationskanäle ermöglichen, wo eine Nachricht prinzipiell nicht abgefangen werden kann, ohne in dem Prozess zerstört zu werden. Siehe z. B. H. J. Briegel u. a., LANL-Vorabdruck quant-ph/9803056 (1998).

[0005] Allgemein umfasst das Quantenrechnen das Initialisieren der Zustände von N Qubits (Quantenbits), das Erzeugen kontrollierter Verschränkungen zwischen den N Qubits, das Zulassen, dass sich die Zustände des Qubit-Systems entwickeln, und das Lesen der Qubits danach. Ein Qubit ist herkömmlich ein System mit zwei entarteten Quantenzuständen (Quantenzuständen gleicher Energie) mit einer von null verschiedenen Wahrscheinlichkeit, dass das System in beiden Zuständen gefunden wird. Somit können N Qubits einen Anfangszustand definieren, der eine Kombination von 2^N klassischen Zuständen ist. Dieser verschränkte Anfangszustand unterliegt einer Entwicklung, die durch die Wechselwirkungen bestimmt ist, die die Qubits sowohl zwischen sich selbst als auch mit äußeren Einflüssen aufweisen. Diese Entwicklung definiert eine Berechnung, tatsächlich 2^N gleichzeitige klassische Berechnungen, die durch das Qubit-System ausgeführt werden. Das Auslesen der Qubits nach der Entwicklung bestimmt vollständig ihre Zustände und somit die Ergebnisse der Berechnungen.

[0006] Für die Qubits in einem Quantencomputer sind mehrere physikalische Systeme vorgeschlagen worden. Ein System verwendet Moleküle mit entarteten Kernspinzuständen, siehe N. Gershenfeld und I. Chuang, "Method and Apparatus for Quantum Information Processing", US-Patent 5.917.322. Kernresonanztechniken (NMR-Techniken) können die Spinzustände lesen. Diese Systeme realisieren erfolgreich einen Suchalgorithmus, siehe z. B. M. Mosca, R. H. Hansen und J. A. Jones, "Implementation of a quantum search algorithm on a quantum computer", *Nature*, 393: 344–346, 1998, und die Literaturhinweise darin, und eine Anzahl von Ordnungsalgorithmen, siehe z. B. Lieven, M. K. Vandersypen, Matthias Steffen, Gregory Breyta, Costantino S. Yannoni, Richard Cleve und Isaac L. Chuang, "Experimental realization of order-finding with a quantum computer", Los Alamos-Vorabdruck quant-ph/0007017 (2000). Der Zahlenordnungsalgorithmus ist verwandt mit der Quanten-Fourier-Transformation, einem wesentlichen Element sowohl des Shor-Algorithmus zum Faktorisieren einer natürlichen Zahl als auch des Grover-Suchalgorithmus zum Durchsuchen unsortierter Datenbanken. Allerdings stehen Anstrengungen zur Erwei-

terung dieser Systeme auf eine kommerziell nutzbare Anzahl von Qubits schwierigen Herausforderungen gegenüber.

[0007] Ein Verfahren zum Bestimmen des Zustands eines supraleitenden Hochfrequenz-Quanteninterferenzvorrichtung-Qubits (RF-SQUID-Qubits) (eines weiteren Typs eines Phasen-Qubits) umfasst eine schnelle Einzelflussquanten-Schaltungsanordnung (RSFQ-Schaltungsanordnung). Siehe Roberto C. Rey-de-Castro, Mark F. Bocko, Andrea M. Herr, Cesar A. Mancini, Marc J. Feldman, "Design of an RSFQ Control Circuit to Observe MQC on an rf-SQUID", IEEE Trans. Appl. Supercond., 11, 1014 (März 2001). Ein Zeitgeber kontrolliert die Ausleseschaltungsanordnung und löst mit einem einzigen Eingangsimpuls den gesamten Prozess aus, wobei er nur für einen der zwei möglichen Qubit-Endzustände einen Ausgangsimpuls erzeugt. Das Risiko dieses Ausleseverfahrens liegt in der induktiven Kopplung mit der Umgebung, die während der Quantenentwicklung eine Dekohärenz oder Störung des Qubits verursacht. Die Ausleseschaltungsanordnung versucht, die Dekohärenz zu verringern, indem sie das Qubit mit induktiven Zwischenschleifen isoliert. Obgleich dies wirksam sein kann, ist die Zusatzbelastung groß und die gesamte Skalierbarkeit beschränkt.

[0008] Eine physikalische Realisierung eines Phasen-Qubits umfasst eine mikrometergroße supraleitende Schleife mit 3 oder 4 Josephson-Übergängen. Siehe J. E. Mooij, T. P. Orlando, L. Levitov, Lin Tian, Caspar H. van der Wal und Seth Lloyd, "Josephson Persistent-Current Qubit", Science 1999, 13. August, 285: 1036–1039. Die Energieniveaus dieses Systems entsprechen verschiedenen Mengen Magnetfluss, der die supraleitende Schleife schneidet. Das Anlegen eines statischen Magnetfelds normal zu der Schleife kann zwei dieser Niveaus (oder Grundzustände) in die Entartung bringen. Üblicherweise werden externe elektromagnetische Wechselfelder angelegt, um das Tunneln zwischen nicht entarteten Zuständen zu ermöglichen.

[0009] Es ist vorgeschlagen worden, dass das Auslesen von Phasen-Qubits durch direktes Messen ihrer magnetischen Zustände wie etwa durch Erfassen des Magnetfelds eines Qubits ausgeführt werden könnte, wobei jeder Zustand des Phasen-Qubits einen anderen Magnetfeldwert hat (siehe z. B. BLAIS, A., u. a.: "Operation of universal gates in a solid-state quantum computer based on clean Josephson junctions between d-wave superconductors", PHYSICAL REVIEW A (ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS), April 2000, APS THROUGH AIP, USA, Bd. 61, Nr. 4, S. 042308/1-4, und MAKHLIN, Y., u. a.: "Nanoelectronic circuits as quantum bits", ISCAS 2000 GENEVA; 2000 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS. EMER-

GING TECHNOLOGIES FOR THE 21ST CENTURY, GENEVA, SWITZERLAND, 28–32 MARCH 2000, S. 241–244, Bd. 2). Allerdings weist ein solcher Zugang eine Anzahl von Nachteilen einschließlich erhöhter Dekohärenz in dem Qubit-System und Fehlen der Skalierbarkeit auf.

[0010] Ferner sind gegenwärtig bekannte Verfahren für das Verschränken von Qubits ebenfalls für den Verlust der Kohärenz anfällig. Das Verschränken von Quantenzuständen von Qubits kann ein wichtiger Schritt bei der Anwendung von Quantenalgorithmen sein. Siehe z. B. P. Shor, SIAM J. of Comput. 26:5, 1484–1509 (1997). Gegenwärtige Verfahren zum Verschränken von Phasen-Qubits erfordern die Wechselwirkung des Flusses in jedem der Qubits, siehe Yuriy Makhlin, Gerd Schon, Alexandre Shnirman, "Quantum state engineering with Josephson junction devices", LANL-Vorabdruck cond-mat/0011269 (November 2000). Diese Form der Verschränkung ist empfindlich für die Qubit-Kopplung mit umgebenden Feldern, die eine Dekohärenz und einen Informationsverlust veranlassen.

[0011] Wie oben diskutiert wurde, umfassen gegenwärtig vorgeschlagene Verfahren zum Auslesen, zur Initialisierung und zur Verschränkung eines Qubits die Erfassung oder Manipulation von Magnetfeldern am Ort des Qubits, was diese Verfahren anfällig für Dekohärenz macht und die Gesamtskalierbarkeit der resultierenden Quantenrechenvorrichtung begrenzt. Somit besteht ein Bedarf an einer effizienten Realisierung und an einem effizienten Verfahren, die die Dekohärenz sowie weitere Quellen von Rauschen minimieren und die Skalierbarkeit maximieren.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0012] In Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung enthält ein Quantenrechensystem ein Kontrollsystem, das Ströme und Spannungen zur Ausführung von Operationen an Qubits nutzt. Die an den Qubits ausgeführten Operationen können das Lesen des Zustands des Qubits, die Initialisierung des Zustands des Qubits und die Verschränkung des Zustands des Qubits mit den Zuständen anderer Qubits in dem Quantenrechensystem enthalten. In einigen Ausführungsformen enthalten die Qubits supraleitende Dauerauslese-Qubits (PRSQs). Allerdings können Ausführungsformen der Erfindung irgendein Phasen-Qubit enthalten.

[0013] In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann das Kontrollsystem ein Phasen-Qubit erden. Die Erdung des Phasen-Qubits friert die Quantentunnelung zwischen den zwei entarteten Zuständen ein. Wenn das Qubit geerdet ist, bewegen sich die Elektronen zwischen dem Qubit und die Erdung frei, so dass die Wellenfunktion des Suprastroms zu einem

der Grundzustände $\pm\Phi_0$ mit einem bestimmten magnetischen Moment kollabiert. Somit bleibt das Qubit in dem zu lesenden Zustand, während die Erdungs-Verbindung offen ist. In einigen Ausführungsformen enthält die Kontrolle einen Einzelelektronentransistor oder einen Paritätsschalter, der das Qubit mit der Erdung koppelt. Durch Modulieren der Spannung an dem Einzelelektronentransistor (SET) kann die Schaltung geöffnet und geschlossen werden und kann der SET darüber hinaus je nach dem besonderen Qubit für ein einzelnes Elektron oder für ein Cooper-Paar (Elektronenpaar) abgestimmt werden.

[0014] In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann das Kontrollsystem einen Strom über das Qubit anlegen, um den Quantenzustand des Qubits zu lesen. Die Entartung in den Grundzuständen des Qubits bedeutet, dass sich der Fluss dann, wenn ein Strom durch das Qubit angesteuert wird, je nach dem Quantenzustand des Qubits, wenn es geerdet ist, (d. h. $\pm\Phi_0$) verschieden verhält. Da die Spannung über das Qubit proportional zu der Ableitung des Quantenflusses in dem Qubit nach der Zeit ist, die von dem Quantenzustand des Qubits abhängt, ist die resultierende Spannung über das Qubit je nach dem Zustand des Qubits ebenfalls verschieden. Somit kann der Quantenzustand des Qubits dadurch gelesen werden, dass das Qubit geerdet wird und ein Strom durch das Qubit angesteuert wird, während die resultierende Spannung über das Qubit gemessen wird. Die gemessene Spannung über das Qubit gibt einen der Zustände des Qubits an.

[0015] In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann das Kontrollsystem das Qubit in der Weise initialisieren, dass es einen seiner Grundzustände belegt. Die Bistabilität des Grundzustands in dem Qubit tritt auf, wenn der Strom durch das Qubit null ist, wobei die klassischen Grundzustände des Qubits $\pm\Phi_0$ sind. Durch Ansteuern des Stroms über das Qubit in einer bestimmten Richtung kann ein erster Zustand ausgewählt werden, während umgekehrt durch Ansteuern eines Stroms über das Qubit in der Gegenrichtung ein zweiter Zustand ausgewählt werden kann. Somit kann das Kontrollsystem gemäß der vorliegenden Erfindung dadurch, dass es einen Strom über das Qubit in einer ersten Richtung ansteuert, einen ersten Zustand initialisieren und kann es dadurch, dass es einen Strom über das Qubit in einer zweiten Richtung, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist, ansteuert, einen zweiten Zustand initialisieren.

[0016] Ferner kann ein Kontrollsystem gemäß der vorliegenden Erfindung in einigen Ausführungsformen Verschränkungen zwischen Quantenzuständen von Qubits in dem Quantenrechensystem kontrollieren. Wenn ein Qubit initialisiert und aus dem festen Zustand freigegeben worden ist, wird es frei, um sich quantenmechanisch zu entwickeln. Die sich entwi-

ckelnde Wellenfunktion speichert die Quanteninformationen des Qubits als eine Superposition von Zuständen. Um Qubits zu verschränken, wird zugelassen, dass sich die entwickelnden Wellenfunktionen überlappen.

[0017] In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann ein Qubit-System aus einem 2-dimensionalen Gitter einzelner Phasen-Qubits bestehen. Zum Beispiel kann ein Gitter N Zeilen und M Spalten von Qubits aufweisen, wobei jeder Index ein Phasen-Qubit aufweisen kann. Jede Zeile des Gitters kann wenigstens eine Leitung zum Anlegen eines Stroms und wenigstens eine Leitung für Erdungsoperationen aufweisen. Ähnlich kann jede Spalte des Gitters wenigstens zwei Leitungen zum Anlegen einer Spannung aufweisen. In einem Qubit-System könnte jedes Qubit in einer Spalte einen Qubit-Schalter aufweisen, so dass das Anlegen einer Spannung an den Schalter den Schalter effektiv schließen könnte, was ermöglicht, dass Strom durchgelassen wird, wenn das Qubit geerdet ist. Jedes Qubit könnte einen Erdungsschalter aufweisen, der das Qubit mit einem Erdungsmechanismus verbindet, so dass eine Spannung, die an den Schalter angelegt wird, den Schalter schließt und das Qubit erdet. Jede Zeile in dem Qubit-System könnte eine Stromleitung aufweisen, so dass das Anlegen eines Stroms (oder Suprastroms) an die Leitung durch das Qubit zur Erdung fließt, wenn der Qubit-Schalter und der Erdungsschalter geschlossen sind. Darüber hinaus kann zwischen jeder jeweiligen Stromleitung und Erdungsleitung ein Mechanismus zum Messen des Potentialabfalls angeordnet sein, um den Potentialabfall zwischen den beiden zu messen. Bei einigen Ausführungsformen der Erfindung können die beschriebenen Strom-, Spannungs- und Erdungsleitungen nach Spalte bzw. Zeile umgekehrt sein oder könnten sie für eine gegebene Zeile oder Spalte auf andere Weise eine Kombination von Strom- und Spannungsleitungen aufweisen.

[0018] Diese und weitere Ausführungsformen werden in Bezug auf die folgenden Figuren im Folgenden weiter beschrieben.

BESCHREIBUNG DER FIGUREN

[0019] [Fig. 1](#) zeigt eine Ausführungsform eines supraleitenden Dauerauslese-Qubits.

[0020] [Fig. 2](#) zeigt ein supraleitendes Dauerauslese-Qubit (PRSQ) mit einem Kontrollsystem.

[0021] [Fig. 3](#) zeigt eine Anordnung von Qubits mit einem Kontrollsystem gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0022] [Fig. 4](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung,

das eine Auslesekontrollschaltungsanordnung enthält, die mit einem Qubit gekoppelt ist.

[0023] [Fig. 5](#) zeigt eine Ausführungsform einer Ausleseschaltungsanordnung eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einer Anordnung von Qubits gekoppelt ist.

[0024] [Fig. 6](#) zeigt eine Ausführungsform einer Auslese- und Initialisierungsschaltungsanordnung eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einem Qubit gekoppelt ist.

[0025] [Fig. 7](#) zeigt eine Ausführungsform einer Auslese- und Initialisierungsschaltungsanordnung eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einem Qubit gekoppelt ist.

[0026] [Fig. 8](#) zeigt eine Anordnung von Qubits, die mit einer Ausführungsform einer Kontrollschaltung gemäß der vorliegenden Erfindung gekoppelt sind, die die Qubits auslesen und initialisieren kann.

[0027] [Fig. 9](#) zeigt eine Ausführungsform eines Hochfrequenz-Einzelelektronentransistors (RF-SET).

[0028] [Fig. 10](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das Qubits verschränken kann.

[0029] [Fig. 11](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das Qubits, die zum Kontrollieren einer Anordnung von Qubits gekoppelt sind, verschränken kann.

[0030] [Fig. 12](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit Qubits gekoppelt ist.

[0031] [Fig. 13](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einer Anordnung von Qubits gekoppelt ist.

[0032] [Fig. 14](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit Qubits gekoppelt ist.

[0033] [Fig. 15](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einer Anordnung von Qubits gekoppelt ist.

[0034] [Fig. 16](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einem Einphasen-Qubit gekoppelt ist.

[0035] [Fig. 17](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einer 2-dimensionalen Anordnung von Phasen-Qubits gekoppelt ist.

[0036] [Fig. 18](#) zeigt eine Ausführungsform eines Kontrollsystems gemäß der vorliegenden Erfindung, das mit einer Anordnung von Qubits gekoppelt ist, wobei das Kontrollsystem Qubits der Anordnung von Qubits verschränken kann.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0037] [Fig. 1](#) zeigt eine Ausführungsform eines Phasen-Qubits **100**. Für Veranschaulichungszwecke ist das Phasen-Qubit **100** in den [Fig. 1–Fig. 18](#) als ein supraleitendes Dauerauslese-Qubit gezeigt. Allerdings kann das Phasen-Qubit **100** irgendein Phasen-Qubit einschließlich z. B. einer Mikrometergroßen supraleitenden Schleife mit mehreren Josephson-Übergängen und einer supraleitenden Hochfrequenz-Quanteninterferenzvorrichtung (RF-SQUID) sein.

[0038] Ein Entwurf eines supraleitenden Dauerauslese-Qubits (PRSQ) wurde erstmals von Alexandre Zagoskin, US-Patentanmeldung lfd. Nr. 09/452749, "Permanent Readout Superconducting Qubit", eingereicht am 1. Dezember 1999, hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt, offenbart. In einigen Ausführungsformen besteht ein PRSQ wie etwa ein Qubit **100** aus [Fig. 1](#) aus einem Trägersupraleiter **110**, aus einer Korngrenze **111**, aus einer mesoskopischen Insel **120** (d. h. aus einer Insel, die eine solche Größe hat, dass ein einzelnes Überschuss-Cooper-Paar messbar ist) und aus einer Verbindung, die geerdet werden kann, um das Qubit **100** zu erden. Der bei der Herstellung des PRSQ genutzte Werkstoff kann ein Hoch- T_c -Supraleiter mit einer Paarungssymmetrie sein, der eine dominante Komponente mit von null verschiedenem Drehimpuls und eine subdominante Komponente, die irgendeine Paarungssymmetrie aufweisen kann, enthält. Das resultierende Qubit hat die Grundzustände $\pm\Phi_0$, wobei Φ_0 ein Quant der Phase in Bezug auf die Phase Φ des Trägersupraleiters ist.

[0039] Das Qubit **100** enthält einen Trägersupraleiter **110**, einen supraleitenden Finger **112**, der über die Korngrenze **111** verläuft, eine supraleitende mesoskopische Insel **120** und einen zwischen die supraleitende Insel **120** und die Erdung **131** geschalteten Erdungsschalter **130**. Der Trägersupraleiter **110** kann aus einem supraleitenden Werkstoff mit einer dominanten Paarungssymmetrie mit einem von null verschiedenen Drehimpuls hergestellt sein. Der Kristallorientierungswinkel des Trägersupraleiters **110** hängt mit der Orientierung des supraleitenden Ordnungsparameters A_{109} zusammen und ist durch die Wellenfunktion **109** veranschaulicht. Ähnlich ist die mesoskopische Insel **120** aus einem supraleitenden Werkstoff mit einer dominanten Paarungssymmetrie mit einem von null verschiedenen Drehimpuls hergestellt. Die Kristallorientierung der Insel **120** ist in Bezug auf die Kristallorientierung des Trägersupraleiters **110**

um einen Winkel A_{119} fehlangepasst. Die Orientierung des Ordnungsparameters ist teilweise durch die Kristallorientierung bestimmt, so dass die Wellenfunktion **119** effektiv ebenfalls in Bezug auf die Wellenfunktion **109** gedreht ist. Diese Fehlanpassung der Ordnungsparameter in der Insel **120** und im Trägerwerkstoff **110** führt zu einer Zeitumkehrsymmetriebrechung in dem Suprastrom an der Korngrenze zwischen dem Trägerwerkstoff **110** und der Insel **120**. Der Fehlanpassungswinkel A_{119} zwischen der Wellenfunktion **109** und der Wellenfunktion **119** kann variieren und hängt von der Ausführungsform der Erfindung ab. In einer Ausführungsform, bei der A_{119} 45° ist, ist der spontane Strom an der Korngrenze maximal.

[0040] Obgleich die Zustände des Qubits **100** in der Doppelentartung des Flusses gespeichert sind, ist der Bereich, in dem der Fluss aufrechterhalten wird, viel stärker als in alternativen Phasen-Qubit-Entwürfen lokalisiert. Somit ist das PRSQ natürlich weniger anfällig für eine Kopplung mit externen Magnetfeldern und für andere Dekohärenzquellen.

[0041] Einzel-Qubit-Operationen an asymmetrischen Qubits wie etwa am Qubit **100** können dadurch ausgeführt werden, dass der Transportstrom durch das Qubit **100** (d. h. zwischen der Insel **120** und dem Trägerwerkstoff **110**) moduliert wird. Das Einstellen des Transportstroms IT auf null stellt den effektiven Hamilton-Operator, der das Quantensystem des Qubits **100** beschreibt, proportional zu $\hat{\sigma}_x$ ein, was als eine Pauli-Matrix bezeichnet wird. In der Basis, in der die Qubit-Grundzustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ so gewählt sind, dass der Zustand $|0\rangle$ dem Vektor $(1, 0)$ entspricht und der Zustand $|1\rangle$ dem Vektor $(0, 1)$ entspricht, ist

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Diese Basis kann die Z-Diagonalebasis genannt werden. In dieser Basis dreht die Pauli-Matrix $\hat{\sigma}_x$ einen der Grundzustände in den anderen Grundzustand (d. h. $\hat{\sigma}_x|0\rangle = |1\rangle$ und $\hat{\sigma}_x|1\rangle = |0\rangle$).

[0042] Der effektive Hamilton-Operator, der das Qubit-System des Qubits **100** beschreibt, enthält einen Term proportional zu $\Delta_v(I)\hat{\sigma}_x$, wobei das Tunnelmatrixelement $\Delta_v(I)$ je nach der Coulomb-Energie und der Josephson-Energie des Qubit-Systems des Qubits **100** über einen großen Bereich variiert werden kann. In einigen Ausführungsformen der Erfindung liegt die Tunnelamplitude in der Größenordnung von 10 GHz. Um die Quantenalgorithmen erfolgreich zu realisieren, sollten die am Qubit **100** ausgeführten Operationen eine höhere Frequenz als die Tunnelamplitude aufweisen, oder das Quantensystem des Qubits **100** kann unvorhersagbar werden. Zum Beispiel kann sich der Zustand des Qubits **100** dann, wenn die Frequenz des Erdungsschalters **130**

niedriger als die Tunnelamplitude des Qubits **130** ist, zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die Erdung angelegt wurde, und dem tatsächlichen Zeitpunkt, zu dem die Erdung im Qubit **100** realisiert wurde, entwickeln.

[0043] Um die für nutzbares Quantenrechnen benötigte Skala zu erzielen, sollten alle Dekohärenzquellen in dem Qubit-System minimiert werden. Phasen-Qubits mit delokalisierten Magnetfeldern begrenzen wegen der unerwünschten Kopplung zwischen den einzelnen Qubits sowie wegen der stärker nachteiligen Kopplung mit der Umgebung ihre Gesamtskalierbarkeit. Falls das Qubit **100** ein Phasen-Qubit ist, das aus einem supraleitenden Ring hergestellt ist, kann es eine Tendenz zur induktiven Kopplung mit der Umgebung geben. Ein System, das Qubits umfasst, die aus supraleitenden Ringen hergestellt sind, sollte dann in der Weise beabstandet sein, dass die Induktivität mit anderen Qubits und mit einer umgebenden stromführenden Schaltungsanordnung minimiert ist. Einige vorgeschlagene Ausführungsformen von Phasen-Qubits weisen eine niedrige Induktivität und somit eine niedrige inhärente Kopplung mit der Umgebungsschaltungsanordnung auf.

[0044] Ein supraleitendes Dauerauslese-Qubit (PRSQ) wie etwa das von A. Zagoskin offenbarte Qubit **100** aus [Fig. 1](#) kann wegen der verringerten unerwünschten induktiven Kopplung zwischen den Qubits eng beabstandete Qubits bereitstellen. Das Qubit **100** speichert Zustandsinformationen in hochlokalisierten Phasen und Dauerströmen und minimiert somit irgendwelche potentiellen Kopplungseffekte mit benachbarten Qubits. Die niedrige Induktivität im Qubit **100** kann zulassen, dass benachbarte Qubits mit einem näheren Abstand angeordnet werden und weiter eine umgebende Kontrollsystemschaltungsanordnung zulassen.

[0045] [Fig. 2](#) zeigt ein Qubit **100**, das mit einem Kontrollsystem **800** gekoppelt ist. Das Kontrollsystem **800** kann z. B. über die Leitung **801** mit dem Träger-supraleiter **110** und z. B. über die Leitung **802** mit der Insel **120** gekoppelt sein. Die Kontrolleinheit **800** kann Ströme durch das Qubit **100** bereitstellen und kann das Qubit **100** erden, um die Quantenzustände des Qubits **100** auszulesen oder um die Quantenzustände des Qubits **100** zu initialisieren.

[0046] Die Kontrolleinheit **800** kann den Zustand des Qubits **100** dadurch auslesen, dass sie das Qubit **100** erdet, einen Strom über das Qubit **100** anlegt, eine Spannung über das Qubit **100** misst und anhand der gemessenen Spannung den Quantenzustand des Qubits **100** interpretiert. Wenn sich der Quantenzustand des Qubits **100** quantenmechanisch entwickelt, sind die Zustände des Qubits **100** in einer Superposition der zwei entarteten Quantenzustände. Wenn das Qubit **100** geerdet wird, kollabiert die Wel-

lenfunktion zu einem der zwei verfügbaren entarteten Grundzustände. Während ein Strom über das Qubit **100** angelegt wird, ändert sich der Fluss, der den Grundzustand (d. h. entweder den Grundzustand $|0\rangle$ oder den Grundzustand $|1\rangle$) des Qubits **100** definiert, von einem Grundzustand in einen angeregten Zustand. Da die Spannung von der Ableitung des Flusses nach der Zeit abhängt, ergibt sich eine Spannung, die von dem Zustand des Qubits **100** zur Zeit der Erdung abhängt. Falls der Fluss (Qubit-Zustand) zum Zeitpunkt der Erdung einen ersten Zustand belegt, kann eine Menge von Spannungszuständen erfasst werden, während sich dann, wenn der Fluss zum Zeitpunkt der Erdung einen zweiten Zustand belegt, ein einzelner Spannungsimpuls ergibt. Darüber hinaus können die erfassbaren Spannungsimpulse zeitlich aufgelöst werden, so dass ein Verfahren zum Unterscheiden zwischen den Zuständen des Qubits erhellt wird.

[0047] Eine Ausführungsform eines Verfahrens zum Auslesen des Zustands eines Qubits kann das Erden eines Qubits, das Anlegen eines Stromimpulses über das Qubit zur Erdung und das Messen eines Potentials über das Qubit in Bezug auf die Erdung enthalten. Der Potentialabfall kann die Form eines oder mehrerer Impulse aufweisen, wodurch die zeitliche Position der Impulse in Bezug auf den Anfangsdurchgang des Stroms über das Qubit aufgelöst werden kann. In einer Ausführungsform eines Verfahrens zum Auslesen des Zustands des Qubits kann für eine feste Zeitdauer in Bezug auf den Durchgang des Stroms über das Qubit eine Potentialmessung vorgenommen werden. Anhand des Vorhandenseins oder der Abwesenheit einer Änderung des während der Zeitdauer über das Qubit gemessenen Potentials kann eine Korrelation des Qubit-Zustands vorgenommen werden.

[0048] Die theoretischen I-V-Charakteristiken supraleitender Werkstoffe zeigen einen Bereich, über den der in dem Supraleiter fließende Strom üblicherweise zwischen $\pm I_c$ variieren kann, wobei die Spannung null ist. Somit wird I_c der kritische Strom in dem Supraleiterwerkstoff genannt. Für Werte des Stroms jenseits des kritischen Stroms treten dynamische Prozesse auf, wobei der supraleitende Werkstoff widerstandsbehaftet wird. Im nicht idealen Fall ist der Suprastrombereich $\pm I_c$ nicht einer Spannung null, sondern einer Spannung von nahezu null, die typisch durch einen Subgap-Widerstand versetzt ist, über das Qubit **100** zugeordnet. Somit kann zum Auslesen eines klassischen Zustands des Qubits **100** ein Strom bei dem kritischen Strom oder kleiner als der kritische Strom des Systems angelegt werden.

[0049] Das Anlegen eines Stroms über den 111-Übergang des Qubits **100** bewirkt das Vorspannen der Grundzustände des Qubits **100**, was die Entartung der entarteten Grundzustände des Qubits **100**

effektiv entfernt. Einer der entarteten Grundzustände wird dann energetisch gegenüber dem anderen bevorzugter. Falls der angelegte Strom den kritischen Strom des Qubit-Übergangs **111** übersteigt, entweicht die Energie der Quantenzustände im Qubit **100** aus dem Potentialtopf, wobei sich ein Driftfluss oder eine endliche Spannung ergibt. Da der Vorstrom die Doppelentartung der Grundzustände im Qubit **100** entfernt, hängt der kritische Strom im supraleitenden Qubit **100** vom Quantenzustand des Qubits **100** ab. Wenn z. B. ein Vorstrom einen ersten Zustand energetisch bevorzugt und das geerdete Qubit **100** diesen ersten Zustand belegt, ist der kritische Strom I_{c1} , während dann, wenn das geerdete Qubit **100** einen zweiten Zustand belegt, der kritische Strom I_{c2} ist. Die Werte der zustandsabhängigen kritischen Ströme hängen von der Ausführungsform des Qubits **100** ab, wobei die Werte von I_{c1} und I_{c2} aber durch Auswählen einer geeigneten Tunnelbarrierehöhe in dem Potentialtopf verschieden gemacht werden können. Die Höhe der Tunnelbarriere in der potentiellen Energie des Qubits **100** kann durch Abstimmen der Tunnelamplitude des Qubits eingestellt werden. Dies kann z. B. durch Abstimmen der Kapazität des Qubits **100** ausgeführt werden.

[0050] Falls die kritischen Ströme I_{c1} und I_{c2} bereits bekannt sind, kann durch Anlegen eines Vorstroms mit einem Betrag zwischen den zwei kritischen Strömen, z. B. mit $(I_{c1} + I_{c2})/2$, der Quantenzustand des Qubits **100** durch Messen des resultierenden Potentialabfalls über das Qubit **100** (d. h. zwischen der Insel **120** und dem supraleitenden Substrat **110**) bestimmt werden. Falls z. B. I_{c1} der niedrigere der zwei kritischen Ströme ist und das Quantensystem des Qubits **100** dem Quantenzustand mit dem kritischen Strom I_{c1} entspricht, übersteigt der angelegte Strom den kritischen Strom des Systems, wobei sich in einer messbaren Spannung über das Qubit **100** dynamische Effekte ergeben. Falls der Quantenzustand des Qubits **100** alternativ dem Quantenzustand mit dem kritischen Strom I_{c2} entspricht, übersteigt der angelegte Strom nicht den kritischen Strom des Systems, wobei die Messung des Potentialabfalls über das Qubit **100** nur eine dem Subgap-Widerstand zugeordnete kleine Spannung angibt.

[0051] Somit kann die Kontrolleinheit **800** durch Erden des Qubits **100** (d. h. durch Koppeln der Insel **120** mit der Erdung), durch Anlegen eines Vorstroms über das Qubit **100**, wobei der Vorstrom einen Betrag zwischen den den Quantenzuständen des Qubits **100** zugeordneten kritischen Strömen besitzt, und durch Messen des Potentialabfalls über das Qubit **100** den Quantenzustand des Qubits **100** auslesen.

[0052] Das Qubit-Kontrollsystem **800** aus [Fig. 2](#) kann dann Schaltungen zum Auslesen des Quantenzustands des Qubits **100** enthalten. Das Qubit-Kontrollsystem **800** kann einen mit dem Trägersupraleiter

110 gekoppelten Kontrollzweig **801** und einen mit der Insel **120** des Qubits **100** gekoppelten zweiten Kontrollzweig **802** aufweisen. Das Kontrollsystem **800** kann dann durch Erden des Qubits **100** durch die Kontrollleitung **802**, durch Anlegen eines Stroms an den Trägersupraleiter **110** durch den Kontrollzweig **801** und durch Messen des Potentialabfalls über den Kontrollzweig **801** und über den Qubit-Zweig **802** eine Ausleseprozedur ausführen. Der Strom ist ein Suprastrom von Cooper-Paaren. Somit misst das Kontrollsystem **800** synchronisiert mit dem Anlegen des Stroms an das geerdete Qubit **100** die Spannung über das Qubit **100**. Das Kontrollsystem **800** interpretiert dann den gemessenen Potentialabfall in der Weise, dass er einen der möglichen Zustände des Qubits **100** angibt. Das Kontrollsystem **800** kann dann den gemessenen Quantenzustand des Qubits **100** an ein weiteres System (nicht gezeigt) übermitteln, das über eine Schnittstelle mit dem Qubit-Kontrollsystem **800** verbunden ist.

[0053] Das Kontrollsystem **800** kann ein automatisches Ausleseverfahren nach Art einer integrierten Schaltung bereitstellen. Darüber hinaus ist das Kontrollsystem **800** leicht auf eine Anordnung von Qubits zu verallgemeinern, wodurch ein Ausleseverfahren auf jedes der Qubits in der Anordnung von Qubits nacheinander angewendet werden könnte. Das Qubit-Kontrollsystem **800** stellt eine Schnittstelle bereit, die ein Qubit-System, das das Qubit **100** enthält, weiter von der Umgebung isolieren hilft. Ein externes System könnte dann mit dem Kontrollsystem **800** und nicht direkt mit dem Qubit **100** in Wechselwirkung treten.

[0054] In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann das Kontrollsystem **800** kalibriert werden. Zunächst können die zustandsspezifischen kritischen Ströme des Qubits **100** als eine Kalibrierung des während des Auslesens des Quantenzustands des Qubits **100** anzulegenden Vorstroms bestimmt werden. Daraufhin kann die oben diskutierte Ausleseprozedur ausgeführt werden, wobei der angelegte Vorstrom zwischen den den zwei Quantenzuständen entsprechenden begrenzenden kritischen Strömen liegt. Die Messung des Potentials über das Qubit **100** gibt dann an, welcher Zustand im Qubit **100** vorhanden ist. In einigen Ausführungsformen kann der richtige Vorstrom durch ein System gespeichert werden, das über eine Schnittstelle mit dem Kontrollsystem **800** verbunden ist.

[0055] **Fig. 3** zeigt eine Ausführungsform einer Qubit-Anordnung **300** mit einem mit der Qubit-Anordnung **300** gekoppelten Kontrollsystem **800**. Die Qubit-Anordnung **300** enthält die Qubits **100-1** bis **100-N**. Wie oben beschrieben wurde, ist mit dem supraleitenden Substrat **110**, das den Qubits **100-1** bis **100-N** gemeinsam ist, ein einzelner Kontrollzweig **801** gekoppelt. Die Qubit-Zweige **802-1** bis **802-N**

sind in dieser Reihenfolge mit den Inseln **120-1** bis **120-N** gekoppelt. Die Kontrolleinheit **800** kann wie oben beschrieben an jedem der Qubits **100-1** bis **100-N** Ausleseprozeduren ausführen. In einigen Ausführungsformen ist das Qubit, das gelesen wird, während einer Ausleseprozedur an einem der Qubits **100-1** bis **100-N** geerdet, während die verbleibenden Qubits **100-1** bis **100-N** nicht geerdet sind. Der über den Kontrollzweig **801** und über den Zweig des geerdeten Qubits gebildete Potentialabfall kann durch das Kontrollsystem **800** gemessen und interpretiert werden, um den Quantenzustand des Qubits zu bestimmen, das gelesen wird.

[0056] In einigen Ausführungsformen des Kontrollsystems **800** wird ein gleichzeitiges Auslesen des durch die Qubit-Anordnung **300** repräsentierten Quantenregisters ausgeführt. In einigen Ausführungsformen kann jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** im Qubit-System **300** gleichzeitig geerdet und nacheinander ausgelesen werden. In einigen Ausführungsformen wird nur eines der auszulesenden Qubits **100-1** bis **100-N** geerdet, während sich die verbleibenden Qubits **100-1** bis **100-N** im Qubit-System **300** quantenmechanisch weiter entwickeln. Allerdings kann durch Kenntnis der Tunnelamplitude der Qubits **100-1** bis **100-N** im Qubit-System **300** die Entwicklung vorhergesagt werden und die genaue Zeit bestimmt werden, zu der eines der Qubits **100-1** bis **100-N**, das nachfolgend gelesen wird, wieder in dem geforderten Zustand ist. Somit enthält ein Verfahren zum Auslesen des Zustands eines Quantenregistersystems **300** in einigen Ausführungsformen einen Zeitgebungsmechanismus, durch den jedes aufeinander folgende Qubit der Qubits **100-1** bis **100-N** in entsprechenden Intervallen, die mit einer Rückkehr jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** in den geforderten Zustand korrelieren, ausgelesen wird. **Fig. 4** zeigt eine Ausführungsform eines mit dem Qubit **100** gekoppelten Kontrollsystems **800**. Das Kontrollsystem **800** enthält einen Erdungsschalter **130**, eine Stromquelle **140** und einen Spannungsmesser **150**. Der Erdungsschalter **130** kann die Insel **120** mit der Erdung koppeln. Die Stromquelle **140** ist so gekoppelt, dass sie einen Strom für den Trägersupraleiter **110** bereitstellt. Der Spannungsmesser **150** ist so gekoppelt, dass er den Potentialabfall zwischen der Erdung und dem Trägersupraleiter **110** misst. Falls der Erdungsschalter **130** geschlossen wird, wird der Stromkreis, der den Erdungsschalter, die Stromquelle **140**, den Trägersupraleiter **110** und die mesoskopische Insel **120** enthält, geschlossen, wobei ein Strom über das Qubit **100** fließt. Darüber hinaus wird der Spannungsmesser **150** zwischen dem Trägersupraleiter **110** und der Erdung **131** zum Qubit **100** parallel geschaltet, so dass der Spannungsmesser **150** das Potential über das Qubit **100** misst, wenn der Erdungsschalter **130** geschlossen ist.

[0057] In einigen Ausführungsformen kann der

Schalter **130** ein Einzelelektronentransistor oder ein Paritätsschalter sein, der die Insel **120** mit der Erdung koppeln kann. Durch Modulieren der Spannung an den Einzelelektronentransistoren (SETs) kann die Kontrollschaltung **800** die Erdungsverbindung öffnen oder schließen. Das Verhalten von SETs ist gut definiert und ausführlich in P. Joyez u. a., "Observation of Parity-Induced Suppression of Josephson Tunneling in the Superconducting Single Electron Transistor", Physical Review Letters, Bd. 72, Nr. 15, 11. April 1994, hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt, diskutiert.

[0058] In einigen Ausführungsformen der Erfindung werden die zustandsspezifischen Werte des durch die Stromquelle **140** für das Qubit **100** erzeugten kritischen Stroms kalibriert und zur Charakterisierung des Betrags des Vorstroms verwendet. In einigen Ausführungsformen wird der Vorstrom für jedes der Qubits in dem Qubit-System in einem System bestimmt und gespeichert, das über eine Schnittstelle mit dem Kontrollsystem **800** verbunden ist.

[0059] In einigen Ausführungsformen kann der Spannungsmesser **150** ein Hochfrequenz-Einzelelektronentransistor sein, der auf einer Zeitskala von Picosekunden einen Betrag in der Größenordnung von Mikrovolt messen kann. Siehe z. B. R. J. Schoelkopf, P. Wahlgren, A. A. Kozhevnikov, P. Delsing, D. E. Prober "The Radio-Frequency Single-Electron Transistor (RF-SET): A Fast and Ultrasensitive Electrometer", Science, 280, 1238 (Mai 1998), hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt.

[0060] Ein Ausleseverfahren unter Verwendung der in [Fig. 4](#) gezeigten Ausführungsform des Kontrollsystems **800** enthält das Erden des Qubits **100** durch den Erdungsschalter **130**, das Anlegen eines Vorstroms durch die Stromquelle **140**, das Messen des Potentialabfalls über das Qubit **100** im Spannungsmesser **150** und das Interpretieren des gemessenen Potentialabfalls zur Bestimmung des Quantenzustands des Qubits **100**. In einigen Ausführungsformen kann der Spannungsmesser **150** kalibriert werden, um den gemessenen Quantenzustand des Qubits **100** direkt auszugeben. In einigen Ausführungsformen werden andere Abschnitte des Kontrollsystems **800** kalibriert, um die Spannungsmessung vom Spannungsmesser **150** zu empfangen und um den Quantenzustand des Qubits **100** zu bestimmen.

[0061] Das Qubit **120** kann durch den Erdungsschalter **130** zur Erdung **131** geerdet werden. Die Stromquelle **140** wird mit dem Qubit **100** und mit der Erdung **131** in Reihe geschaltet und der Spannungsmesser **150** wird zum Qubit **100** parallel geschaltet. Wenn der Schalter **130** geschlossen wird, wobei die Insel **120** geerdet wird, kollabiert die Wellenfunktion des Suprastroms zu einem der Grundzustände $\pm\Phi_0$, der ein bestimmtes magnetisches Moment aufweist.

Wenn die Insel **120** geerdet ist und der Quantenzustand des Qubits **100** festgesetzt ist, wird durch die Stromquelle **140** ein Strom durch das Qubit **100** angelegt. Der Strom läuft durch den Trägersupraleiter **110** und durch die Insel **120** zur Erdung **131**. Bei einem durch das Qubit **100** angesteuerten Strom tritt eine zeitabhängige Änderung des Flusses auf und ergibt sich eine Spannung über das Qubit **100**. Der Spannungsmesser **150** misst die Spannung, wobei die erfasste Spannungsspitze interpretiert wird, um den Zustand des Qubits zu bestimmen. In einigen Ausführungsformen liegt der durch die Stromquelle **140** erzeugte Vorstrom zwischen dem Quantenzustand, der den kritischen Strömen des Qubits zugeordnet ist.

[0062] [Fig. 5](#) zeigt ein Beispiel einer Anordnung von Qubits **300**, die mit einer Ausführungsform der Kontrolleinheit **800** gekoppelt sind. Jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** in der Qubit-System-Anordnung der Qubits **300** ist in dieser Reihenfolge mit einem Erdungsschalter **130-1** bis **130-N** gekoppelt, durch den jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** wahlweise mit der Erdung **131** gekoppelt werden kann, wenn das Kontrollsystem **800** den Schalter **130-1** bis **130-N** in dieser Reihenfolge schließt. Darüber hinaus wird die Stromquelle **140** wie in dem in [Fig. 4](#) gezeigten Fall des einzelnen Qubits zwischen den Trägersupraleiter **110** und die Erdung **131** gekoppelt. Der Spannungsmesser **150** wird zwischen dem Trägersupraleiter **110** und der Erdung **131** zu den Qubits **100-1** bis **100-N** parallel geschaltet.

[0063] In einem Ausleseverfahren für das Qubit **100-1** erdet das Kontrollsystem **800** z. B. die Insel **120-1** durch Schließen des Schalters **130-1**. Die Schalter **130-2** bis **130-N** werden offen gelassen. Daraufhin kann das Kontrollsystem **800** über die Stromquelle **140** einen Vorstrom über das Qubit **100-1** anlegen, wobei der Potentialabfall über das Qubit **100-1** durch den Spannungsmesser **150** gemessen werden kann. Der Quantenzustand des Qubits **100-1** wird durch die durch den Spannungsmesser **150** gemessene charakteristische Spannung bestimmt. Daraufhin kann das Ausleseverfahren für alle Qubits **100-1** bis **100-N** der Reihe nach wiederholt werden.

[0064] In einigen Ausführungsformen der Erfindung sind das Kontrollsystem **800** und alle Kopplungsleitungen (d. h. die Leitungen **801** und **802-1** bis **802-N**) aus einem hoch- T_c -supraleitenden Werkstoff wie etwa $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, wobei x-Werte zwischen etwa 0 und etwa 0,6 aufweist, hergestellt. Weitere supraleitende Werkstoffe wie etwa $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$, $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+x}$ und $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$ sind Beispiele von d-Wellen-Supraleitern mit einer Paarungssymmetrie mit einem von null verschiedenen Drehimpuls, die ebenfalls zur Herstellung des Kontrollsystems **800** genutzt werden können. In einigen Ausführungsformen der Erfindung können zur Fertigung des Kon-

trollsystems **800** z. B. der Niedertemperatursupraleiter Sr_2RuO_4 oder der Schwer-Fermionen-Werkstoff CeIrIn_5 genutzt werden, die p-Wellen-Supraleiter sind, die ebenfalls einen von null verschiedenen Drehimpuls aufweisen. Um die Dekohärenz wegen thermischer Effekte zu verringern und das Quantenverhalten zu optimieren, arbeitet das Qubit-System **300** in einigen Ausführungsformen bei einer Temperatur von um 1 K.

[0065] In einigen Ausführungsformen der Erfindung initialisiert das Kontrollsystem **800** außerdem die Quantenzustände der Qubits **100-1** bis **100-N** im Qubit-System **300**. Ein Verfahren zum Initialisieren des Zustands eines Qubits **100** (eines beliebigen der Qubits **100-1** bis **100-N**) enthält das Ableiten eines Stroms über das Qubit in einer spezifischen Richtung und das allmähliche Verringern des Stroms auf null. Die Bistabilität des Grundzustands im Qubit **100** tritt auf, wenn der Vorstrom durch das Qubit **100** auf null verringert wird, wobei die klassischen Quantenzustände des Qubits **100** $\pm\Phi_0$ entsprechen. Somit kann durch Ansteuern eines Stroms über das Qubit **100** in einer bestimmten Richtung ein erster Zustand ausgewählt werden und kann durch Ansteuern eines Stroms über das Qubit **100** in der Gegenrichtung ein zweiter Zustand ausgewählt werden. Wenn der Strom von der positiven Richtung allmählich auf null verringert wird, relaxiert der Flusszustand des Qubits **100** in den Grundzustand $+\Phi_0$. Währenddessen relaxiert der Flusszustand des Qubits **100** in den Grundzustand $-\Phi_0$, falls der Strom von der negativen Richtung allmählich auf null verringert wird. Da die Zustände $+\Phi_0$ und $-\Phi_0$ den bistabilen Grundzuständen des Qubits **100** entsprechen, ist die Wirkung des Anordnens des Qubits **100** in dem einen oder in dem anderen der Zustände gleichwertig der Initialisierung des Zustands des Qubits **100**.

[0066] In einigen Ausführungsformen initialisiert das Kontrollsystem **800** das Qubit **100** dadurch, dass es für eine ausreichende Zeitdauer einen Strom mit kleinem Betrag über das Qubit **100** gerichtet hält. Der Strom von der Stromquelle **140** spannt die potentielle Energie im Qubit **100** effektiv vor und entfernt die Entartung in den klassischen Quantenzuständen. Wenn eine ausreichende Zeitdauer gegeben ist, geht der Quantenzustand des Qubits **100** in den energetisch stärker bevorzugten Zustand über, der durch die Richtung des angelegten Vorstroms von der Stromquelle **140** bestimmt ist.

[0067] [Fig. 6](#) zeigt eine Ausführungsform des mit dem Qubit **100** gekoppelten Kontrollsystems **800**, das einen Quantenzustand des Qubits **100** initialisieren kann. Das Kontrollsystem **800** aus [Fig. 6](#) enthält eine doppelt gerichtete Stromquelle **140** und einen Erdungsschalter **130**, der die Insel **120** mit der Erdung **131** koppeln kann. Der Spannungsmesser **140** in [Fig. 6](#) kann enthalten sein, um die Ausleseproze-

duren des Qubits **100** zu erleichtern.

[0068] Ein Initialisierungsverfahren enthält dann das Schließen des Schalters **130** zum Erden des Qubits **100**, das Anlegen eines Stroms von der Stromquelle **140** mit einem Betrag I_b an das Qubit **100** und daraufhin das allmähliche Verringern des Stroms von der Quelle **140** vom Betrag I_b zurück auf null. In einigen Ausführungsformen legt die Kontrollschaltung **800** einen positiven Strom I_b an, um einen ersten Zustand zu initialisieren, während sie einen negativen Strom I_b anlegt, um einen zweiten Zustand zu initialisieren.

[0069] In einigen Ausführungsformen enthält eine Initialisierungsprozedur das Schließen des Schalters **130**, der die Insel **120** des Qubits **100** erdet, und das Anlegen eines Vorstroms von der Stromquelle **140** durch das Qubit **100** für eine Zeitdauer, die lang genug ist, damit die Quantenzustände des Qubits **100** z. B. durch Tunneln in den ausgewählten Anfangszustand übergehen. In einigen Ausführungsformen hängt die Zeitdauer von der Tunnelrate des Qubit-Systems ab, wobei sie in einigen Ausführungsformen in der Größenordnung der Tunnelamplitude des Qubits **100** liegt, so dass das Quantensystem des Qubits **100** in den ausgewählten Zustand relaxiert.

[0070] [Fig. 7](#) zeigt eine Ausführungsform einer Stromquelle **140**, die doppelt gerichtet ist. Die wie in [Fig. 7](#) gezeigte Stromquelle **140** enthält eine erste Stromquelle **141** und eine zweite Stromquelle **142**. Die Stromquelle **141** ist mit einem Schalter **143** in Reihe geschaltet und die Stromquelle **142** ist mit einem Schalter **144** in Reihe geschaltet. Die Kombination aus der Stromquelle **141** und aus dem Schalter **143** ist zur Stromquelle **142** und zum Schalter **144** parallel geschaltet, die zwischen das supraleitende Substrat **110** und die Erdung **131** geschaltet sind. Das Kontrollsystem **800** kann dann durch Schließen des Schalters **143** und durch Öffnen des Schalters **144** die Stromquelle **141** auswählen, die einen Strom in einer ersten Richtung liefert. Alternativ kann die Stromquelle **800** durch Schließen des Schalters **144** und durch Öffnen des Schalters **143** die Stromquelle **142** auswählen, die einen Strom in einer zweiten Richtung liefert, die zu der ersten Richtung entgegengesetzt ist. In einigen Ausführungsformen kann jeder der Schalter **141** und **143** ein SET sein.

[0071] [Fig. 8](#) zeigt eine Ausführungsform eines wie oben bei [Fig. 7](#) beschriebenen Kontrollsystems **800**, das mit einem Qubit-System **300** gekoppelt ist. Das Qubit-System **300** enthält die Qubits **100-1** bis **100-N**. In einigen Ausführungsformen kann das Kontrollsystem **800** jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** der Reihe nach initialisieren, wobei eines der zu initialisierenden Qubits **100-1** bis **100-N** durch Schließen des jeweiligen einen der Schalter **130-1** bis **130-N**, Erden

des ausgewählten einen der Qubits **100-1** bis **100-N** und Anlegen eines Stroms über eines der Qubits **100-1** bis **100-N**, das initialisiert wird, ausgewählt wird.

[0072] [Fig. 9](#) veranschaulicht eine Ausführungsform eines Spannungsmessers **140**, der mit der Kontrolleinheit **800** genutzt werden kann. Der Spannungsmesser **140** kann ein Hochfrequenz-Einzelelektronentransistor-Elektrometer sein wie etwa das, das z. B. in A. N. Korotkov und M. A. Paalanen, "Charge Sensitivity of Radio-Frequency Single Electron Transistor", Appl. Phys. Lett. 74, 26 (1999), hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt, beschrieben ist. Der Betrieb und das Verhalten von SETs sind gut bekannt und ausführlich in P. Joyez u. a., "Observation of Parity-Induced Suppression of Josephson Tunneling in the Superconducting Single Electron Transistor", Physical Review Letters, Bd. 72, Nr. 15, 11. April 1994, hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt, beschrieben.

[0073] Der RF-SET-Spannungsmesser **140** enthält einen SET **709**, einen offenen Schwingkreis **712** und einen Port zum Anlegen und Erfassen eines Signals **706**. Der Einzelelektronentransistor (SET) **709** kann aus irgendeinem supraleitenden Werkstoff, z. B. aus Niob, Aluminium, Blei, Zinn und irgendeinem hochtemperatur-supraleitenden Cuprat, hergestellt sein. Eine Beschreibung des Betriebs und der Herstellung von Einzelelektronentransistoren ist in P. Joyez u. a., "Observation of Parity-Induced Suppression of Josephson Tunneling in the Superconducting Single Electron Transistor", Physical Review Letters, Bd. 72, Nr. 15, 11. April 1994, und in R. J. Schoelkopf, P. Wahlgren, A. A. Kozhevnikov, P. Delsing und D. E. Prober, "The Radio-Frequency Single-Electron Transistor (RF-SET): A Fast and Ultrasensitive Electrometer", Science, Bd. 280, 1238–42 (22. Mai 1998), hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt, beschrieben. Der SET **709** ist in einem offenen Schwingkreis **712** mit hohem Gütefaktor angeordnet, der auf Resonanz abgestimmt ist. Der offene Schwingkreis **712** enthält eine Induktionsspule **707** und einen Kondensator **708**. Der Kondensator **708** ist zum SET **709** parallel geschaltet. Ein dritter Anschluss des SET **709** ist mit der Elektrode **801** gekoppelt, die im Kontrollsystem **800** mit dem supraleitenden Substrat **110** gekoppelt ist. In die Schaltung **712** wird ein Hochfrequenz- oder Mikrowellensignal **704** eingeführt. Das reflektierte Signal **705** hängt von der Leitfähigkeit des SET **709** ab. Eine Analyse des reflektierten Signals **705** unter Verwendung bestehender Techniken ermöglicht die Messung der Spannungsdifferenz zwischen der Elektrode **710** und der Erdung **131**.

[0074] Wenn im Betrieb über das Qubit **100** ein Strom angesteuert wird und ein rf-SET-Spannungsmesser **140** zum Qubit **100** parallel geschaltet wird,

wird die Resonanz des offenen Schwingkreises **712** gestört, wobei Änderungen der rückkehrenden Mikrowellenimpulse **705** die Erfassung des Quantenzustands des Qubits **100** ermöglichen.

[0075] In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann das Auslesen des Quantenzustands des Qubits **100** unter Verwendung eines Einzelelektronentransistors (SET) gemäß bekannten Prozeduren erfolgen, die z. B. von Makhlin, Y., Schoen, G., und Shnirman, A., "Quantum state engineering with Josephson junction devices", arXiv, cond-mat/0011269, 15. Nov. 2000, hier in seiner Gesamtheit durch Literaturhinweis eingefügt, beschrieben sind. Eine Ausführung eines SET ist als der SET **709** aus [Fig. 9](#) gezeigt. Der SET **709** kann mit drei Vorrichtungen (z. B. mit den Anschlüssen **131**, **801** und **712**) gekoppelt sein. Wenn der SET **709** ungeladen ist, kann ein Elektron oder Cooper-Paar auf den SET **709** tunneln. Allerdings ist der SET **709** klein genug, dass dann, wenn ein Elektron oder Cooper-Paar auf den SET **709** tunnelt, die Ladung des SET **709** elektrisch abstößt und ein weiteres Tunneln auf den SET **709** verhindert. Ein dem SET **709** zugeordneter Anschluss **801** kann die Spannung des SET **709** ändern und den offenen Schwingkreis **712** verstimmen, was die Charakteristik der reflektierten Welle **705** ändert.

[0076] Wie in [Fig. 10](#) gezeigt ist, kann das Kontrollsystem **800** in einigen Ausführungsformen die Quantenzustände zwischen zwei Qubits, den Qubits **100-1** und **100-2** des Qubit-Paars **1000**, verschränken. Ferner kontrolliert das Kontrollsystem **800** aus [Fig. 10](#) über eine Kontrollleitung **820** einen Verschränkungsschalter **155**. Während der freien Entwicklung der Quantenzustände der Qubits **100-1** und **100-2** tritt eine Verschränkung von Qubits auf. Wenn die Qubits **100-1** und **100-2** vollständig von ihren Umgebungen entkoppelt sind, ermöglicht eine Verschränkungsoperation, dass sich die Wellenfunktionen der Quantenzustände jedes der Qubits **100-1** und **100-2** überlappen und somit die Informationen über den Zustand jedes der Qubits **100-1** und **100-2** mischen. Im festen Zustand ist es möglich, die Qubits **100-1** und **100-2** durch physisches Koppeln der Qubits **100-1** und **100-2** miteinander zu verschränken. Dadurch, dass zugelassen wird, dass sich die Dauerströme in den Qubits **100-1** und **100-2** mischen, werden die Zustände der Qubits **100-1** und **100-2** verschränkt.

[0077] Wie in [Fig. 10](#) gezeigt ist, kann das Kontrollsystem **800** die Quantenzustände der Qubits **100-1** und **100-2** dadurch verschränken, dass die Inseln **120-1** und **120-2** der Qubits **100-1** bzw. **100-2** über einen Verschränkungsschalter **155** direkt miteinander gekoppelt werden und der Zustand des Schalters **155** kontrolliert wird. Wenn der Schalter **155** geschlossen ist, kann ein Suprastrom zwischen der Insel **120-1** und der Insel **120-2** übergehen. Das Kontrollsystem **800** kann den Schalter **155**, der die Kopplung zwi-

schen den Qubits **100-1** und **100-2** kontrolliert, für die Realisierung eines Quantenalgorithmus nach Bedarf ein- und ausschalten.

[0078] In einigen Ausführungsformen der Erfindung ermöglicht der Verschränkungsschalter **155** den kohärenten Übergang von Cooper-Paaren, wenn er geschlossen ist, während er die Verbindung zwischen den Qubits **100-1** und **100-2** effektiv trennt, wenn er offen ist. In einigen Ausführungsformen liegt die Schaltrate des Verschränkungsschalters **155** in der Größenordnung der größtmöglichen Tunnelamplitude in den Qubits **100-1** und **100-2**, so dass der Verschränkungsschalter **155** im Vergleich zu den Zeitskalen der Quantenzustandsübergänge in den Qubits **100-1** und **100-2** schnell ist.

[0079] In einigen Ausführungsformen koppelt die Kontrolleinheit **800** die Qubits **100-1** und **100-2** für eine Einheitszeitdauer, wobei die Einheitsdauer von der Ausführungsform der Qubits **100-1** und **100-2** abhängt. In einigen Ausführungsformen kann die Einheitsdauer wenigstens in der Größenordnung der Tunnelamplitude des Qubit-Systems **1000** liegen. Wenn ein Rechenalgorithmus eine längere Kopplungsdauer benötigt, können mehrere Einheitsdauer-verschränkungen kombiniert werden.

[0080] [Fig. 11](#) zeigt eine Ausführungsform der Erfindung mit einer Qubit-Anordnung **300**, die mit einem Kontrollsystem **800** gekoppelt ist, das die Quantenzustände benachbarter Qubits **100-1** bis **100-N** verschränken kann. Durch die Schalter **155-1** bis **155-(N-1)** werden benachbarte Paare von Qubits **100-1** bis **100-N** gekoppelt. Zum Beispiel werden die Qubits **100-1** und **100-2** durch den Schalter **155-1** gekoppelt, während die Qubits **100-(N-1)** und **100-N** durch den Schalter **155-(N-1)** gekoppelt werden. Die Kontrolleinheit **800** ist mit jedem der Schalter **155-1** bis **155-(N-1)** gekoppelt, so dass die Kontrolleinheit **800** die Quantenzustände zwischen benachbarten Qubits **100-1** bis **100-N** in Reaktion auf Algorithmusanweisungen verschränken kann.

[0081] [Fig. 12](#) zeigt eine Ausführungsform der Erfindung, bei der das Kontrollsystem **800** wie oben diskutiert die Qubits **100-1** und **100-2** des Qubit-Paars **1000** initialisieren kann, die Qubits **100-1** und **100-2** auslesen kann und die Qubits **100-1** und **100-2** verschränken kann. Das Kontrollsystem **800** enthält eine doppelt gerichtete Stromquelle **140**, die über die Qubits **100-1** und **100-2** gekoppelt ist, einen Spannungsmesser **150**, der über die Qubits **100-1** und **100-2** gekoppelt ist, Erdungsschalter **130-1** und **130-2**, die zwischen die Inseln **120-1** bzw. **120-2** und die Erdung **131** geschaltet sind, und eine Verschränkungsspannungsquelle **160**, die mit dem Verschränkungsschalter **155** gekoppelt ist, um die Verschränkung zwischen den Qubits **100-1** und **100-2** zu kontrollieren.

[0082] In einigen Ausführungsformen der Erfindung ist der Verschränkungsschalter **155** ein SET oder ein Paritätsschalter, wobei die Spannungsquelle **160** den Verschränkungsschalter **155** in einen offenen Zustand oder in einen geschlossenen Zustand schaltet. Das Kontrollsystem **800** kann die Quantenzustände der Qubits **100-1** und **100-2** durch Anlegen einer Spannung V_g mit der Spannungsquelle **160** an den Verschränkungsschalter **155** verschränken. Daraufhin schließt der Verschränkungsschalter **155**, wobei er zulässt, dass Cooper-Paare zwischen den Qubits **100-1** und **100-2** fließen, so dass sich die Quantenzustände der Qubits **100-1** und **100-2** verschränken. Während der Verschränkungsoperation sind die Erdungsschalter **130** offen, so dass die Qubits **100-1** und **100-2** von der Umgebung isoliert sind und sich quantenmechanisch frei entwickeln.

[0083] Ferner kann das Kontrollsystem **800** in [Fig. 12](#) durch Öffnen des Verschränkungsschalters **155**, durch Erden einer der Inseln **120-1** und **120-2** durch die Erdungsschalter **130-1** und **130-2** und durch Anlegen eines Stroms von der Stromquelle **140**, während die Spannung über eines der Qubits **100-1** und **100-2**, das gelesen wird, beobachtet wird, den Quantenzustand der Qubits **100-1** und **100-2** auslesen. Zusätzlich kann die Kontrolleinheit **800** in [Fig. 12](#) durch Öffnen des Verschränkungsschalters **155**, durch Erden einer der Inseln **120-1** oder **120-2** und durch Anlegen eines Vorstroms von der Stromquelle **140** wie oben beschrieben, so dass der Quantenzustand eines der Qubits **100-1** und **100-2**, die initialisiert werden, in den gewünschten Zustand übergeht, die Zustände der Qubits **100-1** und **100-2** initialisieren.

[0084] [Fig. 13](#) zeigt eine Qubit-Anordnung (ein Qubit-Register) **300**, die mit dem Kontrollsystem **800** gekoppelt ist. Das Kontrollsystem **800** kann an jedem der Qubits **100-1** bis **100-N** Ausleseoperationen ausführen, kann jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** initialisieren und kann benachbarte Paare von Qubits **100-1** bis **100-N** verschränken. Benachbarte Qubits **100-1** bis **100-N** werden durch Verschränkungsschalter **155-1** bis **155-(N-1)** gekoppelt, wobei der Zustand jedes Verschränkungsschalters **155-1** bis **155-(N-1)** in dieser Reihenfolge durch die Spannungsquellen **160-1** bis **160-(N-1)** moduliert werden kann. Zu irgendeiner gegebenen Zeit können gemäß der Anweisung der Kontrolleinheit **800** irgendeine Anzahl von Paaren benachbarter Qubits **100-1** bis **100-N** verschränkt werden. Die Kontrolleinheit **800** verschränkt benachbarte Paare von Qubits **100-1** bis **100-N** in Reaktion auf Algorithmusanweisungen, die an die Kontrolleinheit **800** übermittelt werden können.

[0085] Ferner enthält das Kontrollsystem **800** aus [Fig. 13](#) eine Stromquelle **140**, einen Spannungsmesser **150**, Erdungsschalter **130-1** bis **130-N** und eine Erdung **131**, die, wie oben diskutiert wurde, zulassen,

dass das Kontrollsystem **800** die Quantenzustände der Qubits **100-1** bis **100-N** ausliest und die Quantenzustände der Qubits **100-1** bis **100-N** initialisiert. Auf diese Weise stellt das Kontrollsystem **800** alle Operationen zum Ausführen von Quantenrechenalgorithmen bereit.

[0086] **Fig. 14** zeigt eine weitere Ausführungsform eines Paares von Qubits **1000**, die mit einem Kontrollsystem **800** gekoppelt sind, das die Quantenzustände der Qubits **100-1** und **100-2** auslesen kann, die Quantenzustände in den Qubits **100-1** und **100-2** initialisieren kann und die Quantenzustände in den Qubits **100-1** und **100-2** verschränken kann. Das Kontrollsystem **800** enthält den zwischen die Erdung **131** und die Schalter **130-1** und **130-2** gekoppelten Schalter **132**. Das Kontrollsystem **800** kann dann die Quantenzustände der Qubits **100-1** und **100-2** durch Schließen beider Schalter **130-1** und **130-2** und durch Öffnen des Schalters **132** in der Weise, dass die Schalter **130-1** und **130-2** die Inseln **120-1** bzw. **120-2** nicht erden, verschränken. In einigen Ausführungsformen kann außerdem ein Schalter **145** zwischen der parallel geschalteten Stromquelle **140** und dem Spannungsmesser **150** und dem supraleitenden Substrat **110** enthalten sein. Die Qubits **100-1** und **100-2** können dann von Einflüssen außerhalb der Qubits **100-1** und **100-2** weiter entkoppelt sein.

[0087] Zusätzlich kann eines der Qubits **100-1** und **100-2** dadurch ausgelesen werden, dass der Schalter **132** und der Schalter **145** geschlossen werden, dass einer der Schalter **130-1** oder **130-2**, der dem Qubit entspricht, das gelesen wird, geschlossen wird, dass von der Stromquelle **140** ein Strom angelegt wird und dass mit dem Spannungsmesser **150** die Spannung gemessen wird. Eines der Qubits **100-1** und **100-2** kann dadurch initialisiert werden, dass der Schalter **132** und der Schalters **145** geschlossen werden, dass je nachdem, welches der Qubits **100-1** oder **100-2** initialisiert wird, einer der Schalter **130-1** oder **130-2** geschlossen wird und dass über das eine der Qubits **100-1** und **100-2** von der Quelle **140** eine Strom angelegt wird.

[0088] **Fig. 15** zeigt eine weitere Ausführungsform einer Qubit-Anordnung **300**, die mit einem Kontrollsystem **800** gekoppelt ist, wobei das Kontrollsystem **800** an den Qubits **100-1** bis **100-N** Auslese-, Initialisierungs- und Verschränkungsoperationen ausführen kann. Jedes der Qubits **100-1** bis **100-N** ist in dieser Reihenfolge durch Schalter **130-1** bis **130-N** mit der Erdung gekoppelt, um durch den Schalter **132** zu erden. Das Kontrollsystem **800** kann durch Schließen der Schalter **130-1** bis **130-N** und durch Schließen des Schalters **132** in dieser Reihenfolge jede der Inseln **120-1** bis **120-N** erden. Das Kontrollsystem **800** kann die Zustände benachbarter Qubits **100-1** bis **100-N** durch Schließen der entsprechenden Schalter **130-1** bis **130-N** und durch Öffnen des Schalters **132**

verschränken. Zusätzlich ist das wie in **Fig. 15** gezeigte Kontrollsystem **800** nicht auf die Verschränkung von Quantenzuständen zwischen benachbarten der Qubits **100-1** bis **100-N** beschränkt. Zum Beispiel können die Qubits **120-2** und **120-(N-1)** dadurch verschränkt werden, dass die Schalter **130-2** und **130-(N-1)** geschlossen werden, während der Schalter **132** geöffnet wird. In der in **Fig. 15** gezeigten Ausführungsform des Kontrollsystems **800** kann durch Schließen der jeweiligen Schalter **130-1** bis **130-N** und durch Öffnen des Schalters **132** irgendeine Anzahl von Qubits verschränkt werden.

[0089] **Fig. 16** zeigt ein einzelnes Qubit-System **600**, das ein Qubit **100**, einen Qubit-Schalter **145**, der durch eine Spannung V_{145} moduliert wird, einen Erdungsschalter **130**, der durch eine Spannung V_{130} moduliert wird, eine Stromleitung I_{140} , die durch den Qubit-Schalter **145** mit dem Qubit **100** gekoppelt ist, eine Erdung **131**, die durch den Erdungsschalter **130** mit dem Qubit **100** gekoppelt ist, und einen Spannungsmesser **150**, der zum Messen des Potentialabfalls zwischen der Stromleitung I_{140} und der Erdung **131** gekoppelt ist, enthält. Eine Ausführungsform eines Verfahrens zum Initialisieren des Zustands des Qubits **100** im System **600** kann das Anlegen der Spannungen V_{145} und V_{130} an den Qubit-Schalter **145** bzw. an den Erdungsschalter **130** und das Anlegen eines Stroms I_{140} enthalten. Die Richtung des angelegten Stroms kann den ausgewählten Grundzustand des Qubits **100** bestimmen. Eine Ausführungsform eines Verfahrens zum Auslesen des Zustands des Qubits **100** kann das Anlegen der Spannungen V_{145} und V_{130} an den Qubit-Schalter **145** bzw. an den Erdungsschalter **130**, somit das Erden des Qubits **100**, das Anlegen eines Stroms an die Stromleitung I_{140} , das Messen des Potentialabfalls zwischen der Stromleitung I_{140} und der Erdung **131** und das Interpretieren des Zustands des Qubits **100** anhand des gemessenen Potentialabfalls enthalten.

[0090] **Fig. 17** zeigt eine zweidimensionale Darstellung eines Gitters von Qubits, das Qubits **100-1,1** bis **100-N,M** enthält. Die Qubits **100-1,1** bis zu den Qubits **100-N,M** sind in dieser Reihenfolge durch Schalter **145-1,1** bis **145-N,M** gemäß der Zeile mit Strömen I_{140-1} bis I_{140-N} gekoppelt. Ferner sind die Qubits **100-1,1** bis zu den Qubits **100-N,M** in dieser Reihenfolge durch Schalter **130-1,1** bis **130-N,M** gemäß der Zeile mit der Erdung **131-1** bis **131-N** gekoppelt. Die Schalter **145-1,1** bis **145-N,M** sind gemäß den Spalten mit Kontrollspannungen V_{145-1} bis V_{145-M} gekoppelt. Ferner sind die Schalter **130-1,1** bis **130-N,M** gemäß den Spalten mit Kontrollspannungen V_{130-1} bis V_{130-M} gekoppelt. Ferner messen die Spannungsmesser **150-1** bis **150-N** in dieser Reihenfolge die Potentialabfälle zwischen I_{140-1} bis I_{140-N} und der Erdung **131-1** bis **131-N**. Bei dieser Schreibweise bezieht sich z. B. das Qubit **100-i,j** auf die i-te Zeile und auf die j-te Spalte.

[0091] In einigen Ausführungsformen können die Qubits **100-1,1** bis **100-N,M** durch gleichzeitiges Initialisieren jeder aufeinander folgenden Spalte von Qubits und Fortschreiten über die Spalten initialisiert werden. Zum Beispiel kann zunächst eine Spannung an die Spannungsleitungen V_{145-1} und V_{130-1} angelegt werden, so dass die jeweiligen Qubit-Schalter und Erdungsschalter für jedes Qubit in der ersten Spalte geschlossen werden. Zweitens kann an jede der Stromleitungen I_{140-1} bis I_{140-N} gleichzeitig ein Strom angelegt werden, so dass die Richtung des Stroms in der jeweiligen Stromleitung den zu initialisierenden Grundzustand bestimmt. Daraufhin kann der Prozess für die verbleibenden Spalten in dem Gitter wiederholt werden, so dass zum Initialisieren des gesamten Qubit-Systems insgesamt M Schritte erforderlich sind. Eine Ausführungsform eines Verfahrens zum Auslesen des Zustands des Gitter-Qubit-Systems, der Qubits **100-1,1** bis **100-N,M**, kann das Erden des gesamten Systems durch Schließen jedes der Schalter **100-1,1** bis **100-N,M**, das Anlegen einer Spannung an eine Spalte der Qubit-Schalter **145-1,1** bis **145-N,M** einer Spalte zu lesender Qubits, das Anlegen eines Stroms an die jeweilige Stromleitung des ersten Qubits, das Messen des Potentialabfalls zwischen der jeweiligen Stromleitung und den Erdungsleitungen und das Interpretieren des Zustands des Qubits, das gelesen wird, enthalten. Während der Rechnung können die Qubits **100-1,1** bis **100-N,M** in dem Qubit-System durch Öffnen aller Schalter **145-1,1** bis **145-N,M** und **130-1,1** bis **130-N,M** vollständig von den Umgebungen isoliert sein.

[0092] Wie oben beschrieben wurde, kann ein Aspekt des Quantenrechnens die Verschränkung von Qubit-Zuständen enthalten. Eine Ausführungsform der Erfindung kann ein Verfahren zum Verschränken von Qubits in einem Qubit-System schaffen, wobei das Qubit-System ein 2-dimensionales Gitter-Layout aufweisen kann. Falls die Erdungsleitung einen Leitungserdungsschalter enthält, kann die Leitung als ein Mittel zum Verschränken des Zustands zweier beliebiger Qubits in einer Zeile verwendet werden, wenn die Erdung von der Leitung getrennt wird.

[0093] **Fig. 18** zeigt eine Ausführungsform der Erfindung, in der die Erdungsleitung **131-1** einen Leitungserdungsschalter **132-1**, der durch die Spannung V_{G-132} moduliert wird, enthält. Eine Ausführungsform eines Verfahrens zum Verschränken von Qubits kann das Öffnen des Leitungserdungsschalters **132-1** in der Zeile enthalten, so dass ein mit der Erdungsleitung **131-1** verbundenes Qubit von der Erdung isoliert bleibt. Die Modulation des Erdungsschalters **132-1** kann durch eine Spannungsleitung V_{G-132} kontrolliert werden. In einer Ausführungsform der Erfindung moduliert die Spannungsleitung die Leitungserdungsschalter für alle Zeilen. In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann jeder der Leitungserdungsschalter unabhängig von den ande-

ren Zeilen in dem System moduliert werden. In einer solchen Ausführungsform könnte jedes Qubit unabhängig von allen anderen Qubits in dem System geerdet werden, was das Auslesen und die Initialisierung einzelner Qubits ohne irgendeine Unterbrechung der Berechnung zulässt.

[0094] Obgleich die Erfindung mit Bezug auf bestimmte Ausführungsformen beschrieben worden ist, sind die genau beschriebenen Ausführungsformen nur Beispiele für die Anwendung der Erfindung und sollten nicht als Beschränkung verstanden werden. Der Fachmann auf dem Gebiet erkennt Abwandlungen, die im Erfindungsgedanken und im Umfang der Erfindung liegen. Obgleich die hier diskutierten Ausführungsformen supraleitende Dauerauslese-Qubits enthielten, kann z. B. irgendein Phasen-Qubit enthalten sein. Verschiedene Anpassungen und Kombinationen von Merkmalen der offenbarten Ausführungsformen liegen in dem wie durch die folgenden Ansprüche definierten Umfang der Erfindung.

Patentansprüche

1. Qubit-System, umfassend: mehrere Qubits; und ein Kontrollsystem, das mit jedem entsprechenden Qubit (**100**) der mehreren Qubits gekoppelt ist, wobei das Kontrollsystem enthält: eine Erdungsleitung, wobei die Erdungsleitung einen Schalter (**132**) enthält, der so konfiguriert ist, dass die Erdungsleitung über den Schalter (**132**) mit einer Erdung (**131**) verbunden ist, wenn der Schalter (**132**) geschlossen ist, und die Erdungsleitung von der Erdung (**131**) isoliert ist, wenn der Schalter (**132**) offen ist; und mehrere Erdungsschalter, wobei jeder Erdungsschalter (**130**) der mehreren Erdungsschalter die Erdungsleitung bedingt mit einem entsprechenden Qubit (**100**) der mehreren Qubits koppelt.

2. Qubit-System nach Anspruch 1, wobei das Kontrollsystem so konfiguriert ist, dass es den Quantenzustand von zwei oder mehr Qubits der mehreren Qubits verschränkt, wenn der Schalter (**132**) offen ist.

3. Qubit-System nach Anspruch 2, wobei die mehreren Qubits in einer Anordnung angeordnet sind und ein Qubit der zwei oder mehr Qubits nicht zu irgendeinem anderen Qubit der zwei oder mehr Qubits benachbart ist.

4. Qubit-System nach Anspruch 2, wobei der Quantenzustand der zwei oder mehr Qubits verschränkt wird, wenn jeder entsprechende Erdungsschalter, der den zwei oder mehr Qubits zugeordnet ist, so eingestellt ist, dass die zwei oder mehr Qubits zu einem Zeitpunkt, zu dem der Schalter (**132**) offen ist, mit der Erdungsleitung gekoppelt sind.

5. Qubit-System nach Anspruch 1, ferner umfassend: Mittel zum Auslesen eines Quantenzustands

eines oder mehrerer Qubits der mehreren Qubits.

6. Qubit-System nach Anspruch 1, ferner umfassend: Mittel zum Initialisieren des Quantenzustands eines oder mehrerer Qubits der mehreren Qubits.

7. Qubit-System nach Anspruch 1, ferner umfassend: Mittel zum Verschränken des Quantenzustands eines oder mehrerer Qubits der mehreren Qubits.

8. Qubit-System nach Anspruch 1, wobei die mehreren Qubits in einer Anordnung konfiguriert sind, wobei die Anordnung wenigstens eine Zeile und wenigstens eine Spalte aufweist, und wobei jede Zeile der wenigstens einen Zeile eine lineare Anordnung von zwei oder mehr Qubits umfasst, und wobei jede Spalte der wenigstens einen Spalte eine lineare Anordnung von zwei oder mehr Qubits umfasst; und wobei das Kontrollsystem so konfiguriert ist, dass es einen Quantenrechen-Auslesestrom oder einen Quantenrechen-Initialisierungsstrom dem einen oder den mehreren Qubits der mehreren Qubits bereitstellt.

9. Qubit-System nach Anspruch 8, wobei jeder entsprechende Erdungsschalter der mehreren Erdungsschalter so konfiguriert ist, dass er das Qubit, das dem jeweiligen Erdungsschalter zugeordnet ist, bedingt mit einer Erdung verbindet.

10. Qubit-System nach Anspruch 9, ferner umfassend: mehrere Stromschalter, wobei jeder entsprechende Stromschalter der mehreren Stromschalter einem Qubit der mehreren Qubits zugeordnet ist, und wobei jeder entsprechende Stromschalter so konfiguriert ist, dass er das Qubit, das dem entsprechenden Erdungsschalter zugeordnet ist, bedingt mit einem Quantenrechen-Auslesestrom oder einem Quantenrechen-Initialisierungsstrom verbindet.

11. Qubit-System nach Anspruch 10, wobei das Kontrollsystem ferner eine Kontrollspannung umfasst, um für jedes entsprechende Qubit in einer Zeile von Qubits in der Anordnung den Stromschalter und den Erdungsschalter, der dem entsprechenden Qubit zugeordnet ist, mit dem entsprechenden Qubit schaltbar zu koppeln.

12. Qubit-System nach Anspruch 10, wobei die Qubits in der Anordnung zeilenweise geerdet sind, und wobei das System ferner einen Spannungsmesser umfasst, der zwischen einem Stromschalter und einem Erdungsanschluss eines Qubits der mehreren Qubits angeschlossen ist.

13. Qubit-System nach Anspruch 8, wobei das Kontrollsystem ferner Mittel umfasst zum Initialisieren einer Spalte von Qubits in der Anordnung durch Bereitstellen eines Initialisierungsstroms für jedes

Qubit in der Spalte.

14. Qubit-System nach Anspruch 8, wobei die Kontrollvorrichtung ferner dafür konfiguriert ist, einen Quantenzustand jedes Qubits in einer Spalte von Qubits auszulesen, unter Verwendung von: Mitteln zum Beaufschlagen jedes Qubits in der Spalte von Qubits mit einem Auslesestrom, und Mitteln zum Messen einer Spannung über jedem Qubit in der Spalte von Qubits.

15. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 1 für die Verschränkung des Quantenzustands jedes Qubits der mehreren Qubits, den Schritt umfassend: Koppeln eines ersten Qubits im Qubit-System nach Anspruch 1 mit einem zweiten Qubit im Qubit-System nach Anspruch 1 über wenigstens einen Schalter der mehreren Erdungsschalter.

16. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 15, wobei das erste Qubit einen ersten Quantenzustand, der einem ersten kritischen Strom des ersten Qubits entspricht, und einen zweiten Quantenzustand, der einem zweiten kritischen Strom des ersten Qubits entspricht, aufweist.

17. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 15, wobei das erste Qubit ein Phasen-Qubit ist.

18. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 15, wobei das Koppeln umfasst: Trennen der Erdungsleitung von einer Erdung, Schließen eines ersten Erdungsschalters, der zwischen dem ersten Qubit und der Erdungsleitung angeschlossen ist, um somit die Erdungsleitung und das erste Qubit elektrisch miteinander zu verbinden; und Schließen eines zweiten Erdungsschalters, der zwischen dem zweiten Qubit und der Erdungsleitung angeschlossen ist, um somit die Erdungsleitung und das zweite Qubit elektrisch miteinander zu verbinden.

19. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 1 zum Auslesen des Zustands eines Qubits, die Schritte umfassend: Erden eines Qubits in dem in Anspruch 1 beschriebenen Qubit-System; Bereitstellen eines Stroms durch das geerdete Qubit; Messen einer Spannung über dem geerdeten Qubit; und Bestimmen eines Quantenzustands des Qubits auf der Grundlage der Spannung.

20. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 19, wobei das Qubit einen ersten Quantenzustand, der einem ersten kritischen Strom des Qubits entspricht, und einen zweiten Quantenzustand, der einem zweiten kritischen Strom des Qubits entspricht, aufweist.

21. Verwendung des Qubit-Systems nach An-

spruch 19, wobei das Qubit ein Phasen-Qubit ist.

22. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 19, wobei das Erden ferner das Schließen eines Schalters umfasst, der die Erdungsleitung mit einer Erdung koppelt.

23. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 19, wobei das Bereitstellen das Ermöglichen des Stroms mit einer Stromamplitude umfasst, die zwischen (i) einer Stromamplitude eines ersten kritischen Stroms, der einem ersten Quantenzustand des Qubits entspricht, und (ii) einer Stromamplitude eines zweiten kritischen Stroms, der einem zweiten Quantenzustand des Qubits entspricht, liegt, wobei die Stromamplitude des ersten kritischen Stroms kleiner ist als die Stromamplitude des zweiten kritischen Stroms.

24. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 19, wobei das Bestimmen umfasst: Identifizieren des Quantenzustands des Qubits als ausschließlich in einem ersten Quantenzustand befindlich, wenn die Spannung niedrig ist, und Identifizieren des Quantenzustands des Qubits als ausschließlich in einem zweiten Quantenzustand befindlich, wenn die Spannung hoch ist.

25. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 19, wobei das Bestimmen umfasst: Identifizieren des Quantenzustands des Qubits als ausschließlich in einem ersten Quantenzustand befindlich, wenn ein zeitkorrelierter Spannungsimpuls gemessen wird, und Identifizieren des Quantenzustands des Qubits als ausschließlich in einem zweiten Quantenzustand befindlich, wenn kein zeitkorrelierter Spannungsimpuls gemessen wird.

26. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 1 für die Initialisierung eines Qubits, die Schritte umfassend: Erden eines Qubits im Qubit-System nach Anspruch 1; und Anlegen eines Stroms in einer ausgewählten Richtung durch das Qubit.

27. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 26, wobei das Qubit einen ersten Quantenzustand, der einem ersten kritischen Strom des Qubits entspricht, und einen zweiten Quantenzustand, der einem zweiten kritischen Strom des Qubits entspricht, aufweist.

28. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 26, wobei das Qubit ein Phasen-Qubit ist.

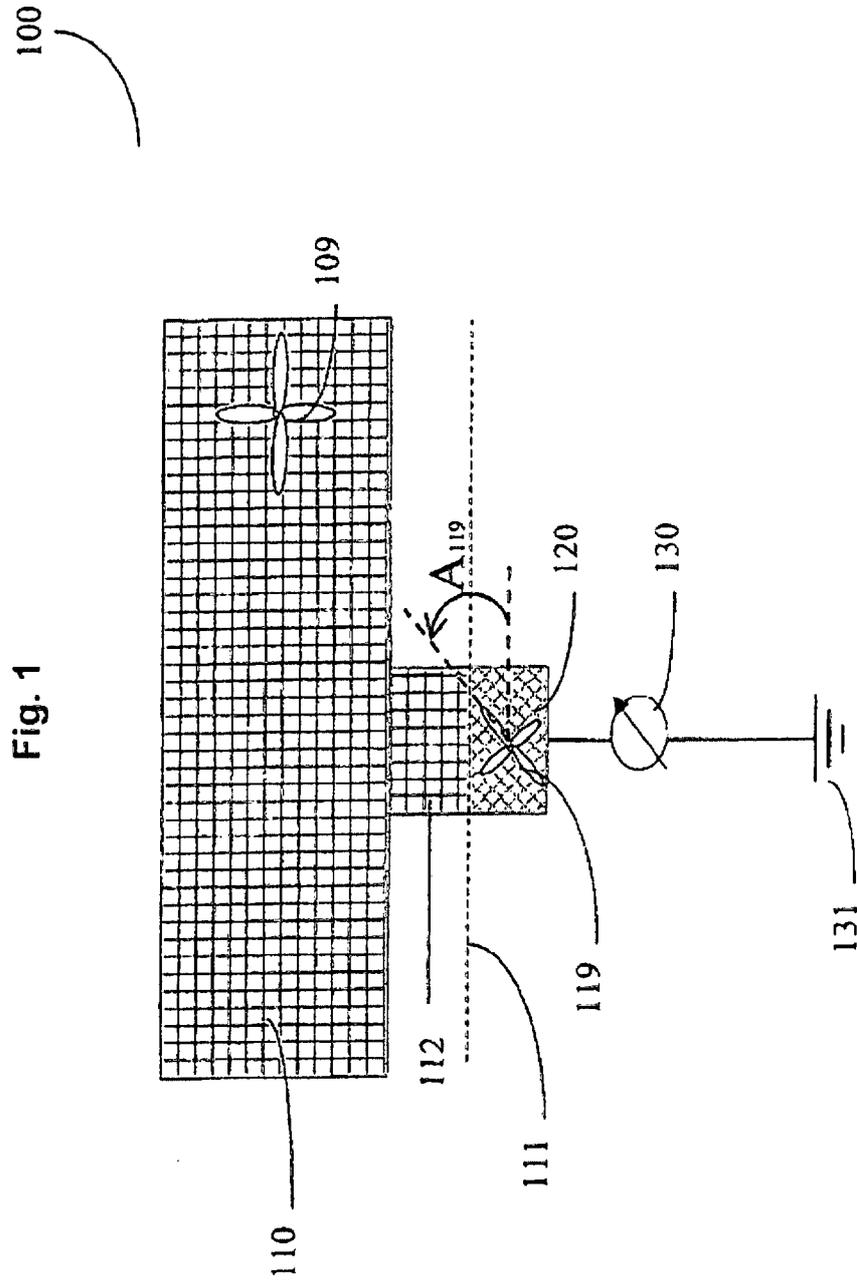
29. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 26, wobei das Anlegen umfasst: Zuführen des Stroms für eine Zeitspanne, die ausreicht, damit sich das Qubit in einen ausgewählten Quantenzustand relaxiert

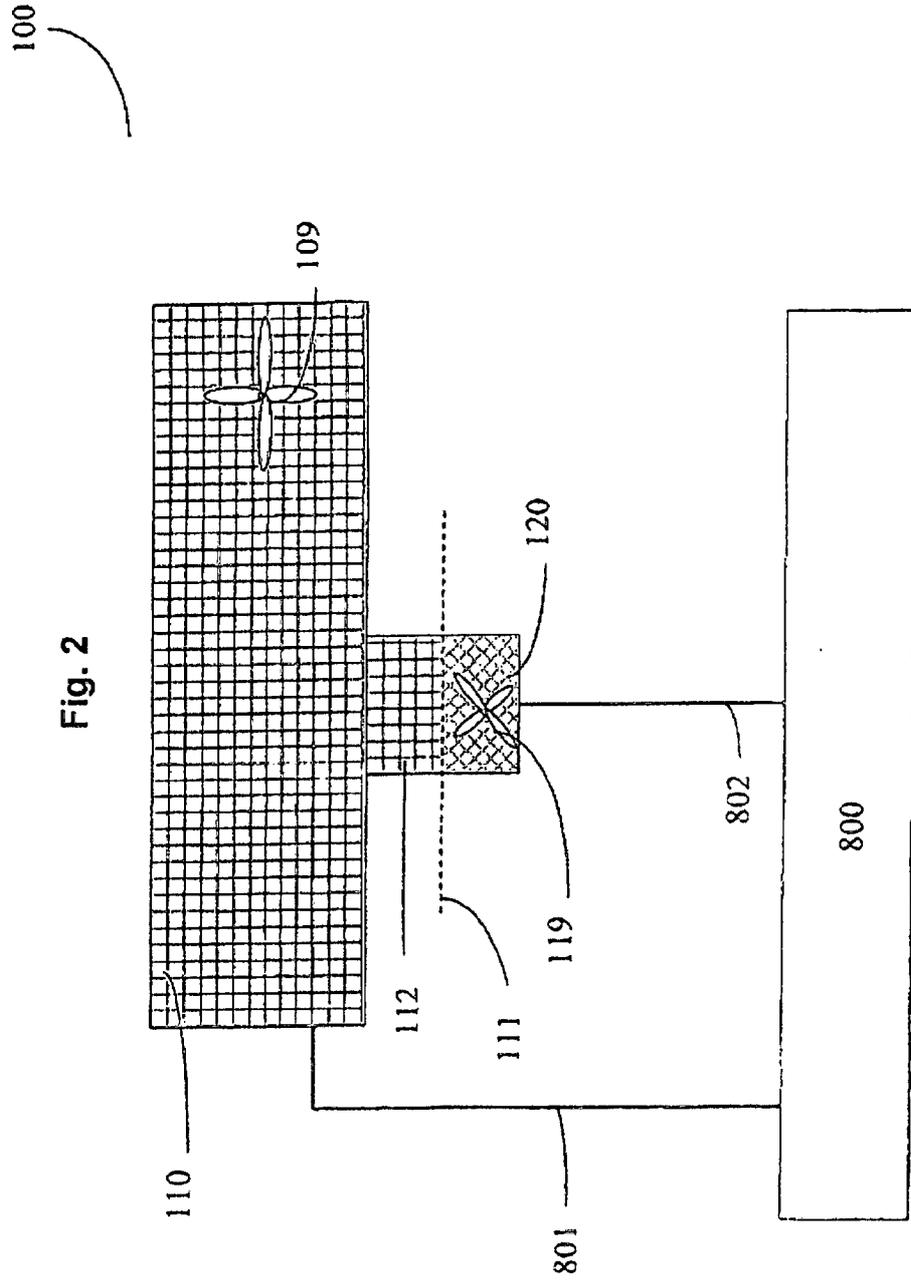
30. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 26, wobei das Anlegen umfasst: Zuführen des Stroms, und allmähliches Verringern des Stroms auf 0, so dass sich der Zustand des Qubits in einen ausgewählten Zustand relaxiert.

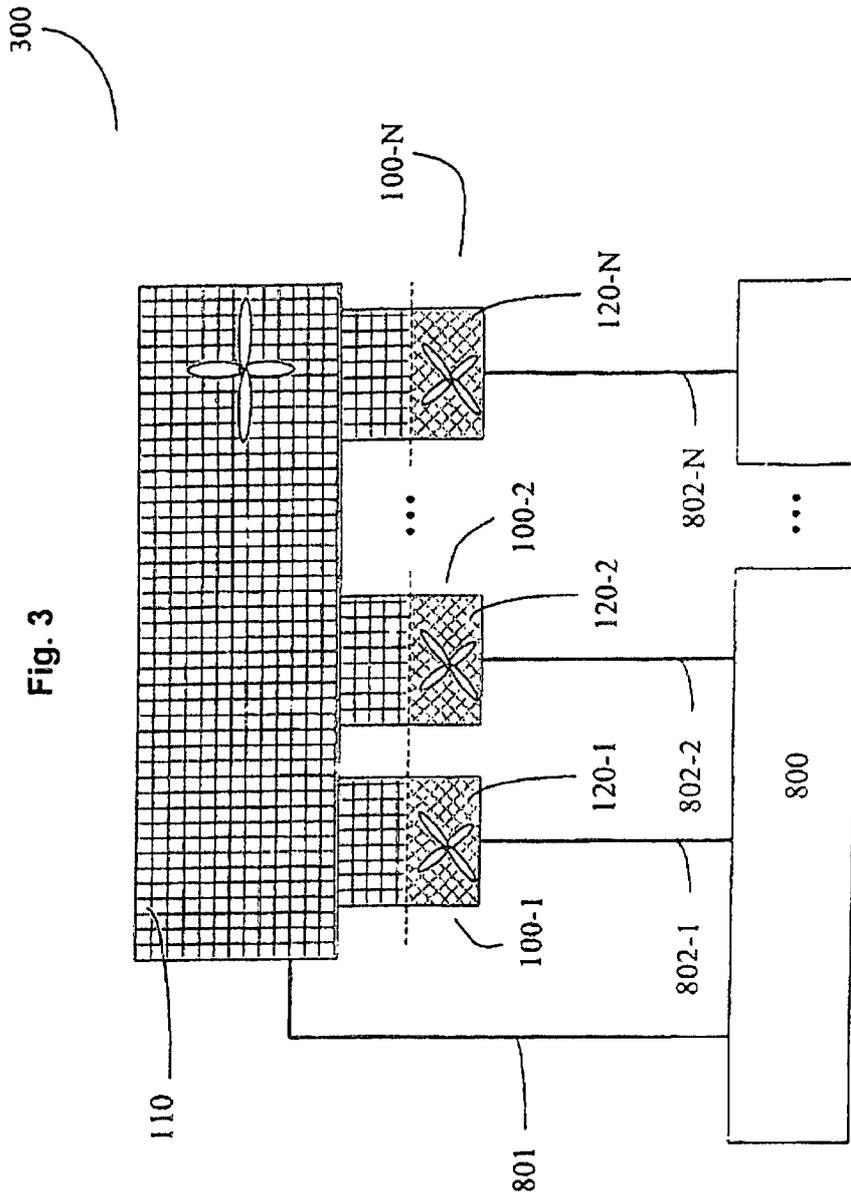
31. Verwendung des Qubit-Systems nach Anspruch 26, wobei das Erden umfasst: Koppeln des Qubits über einen Schalter mit einer Erdung.

Es folgen 18 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen







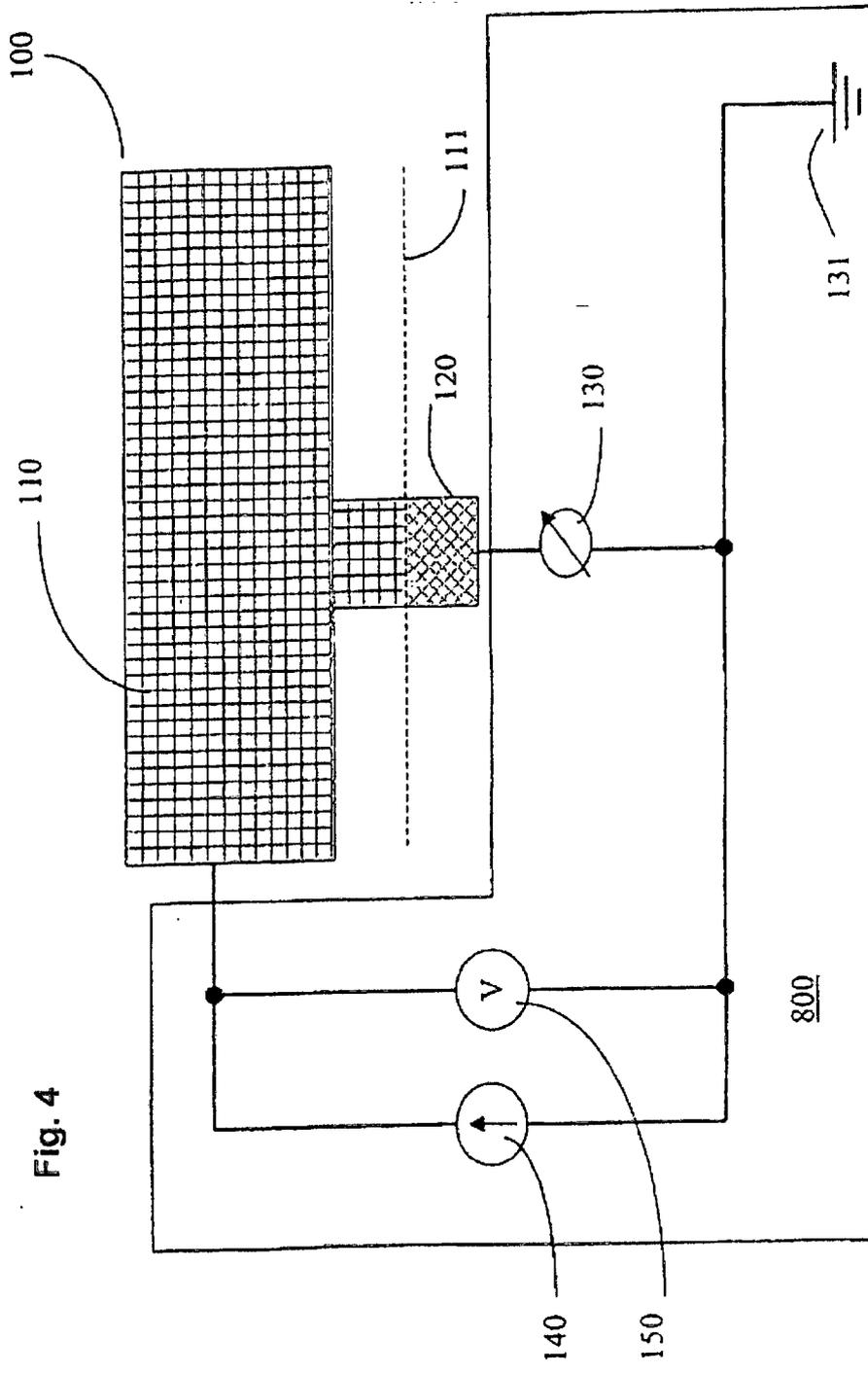
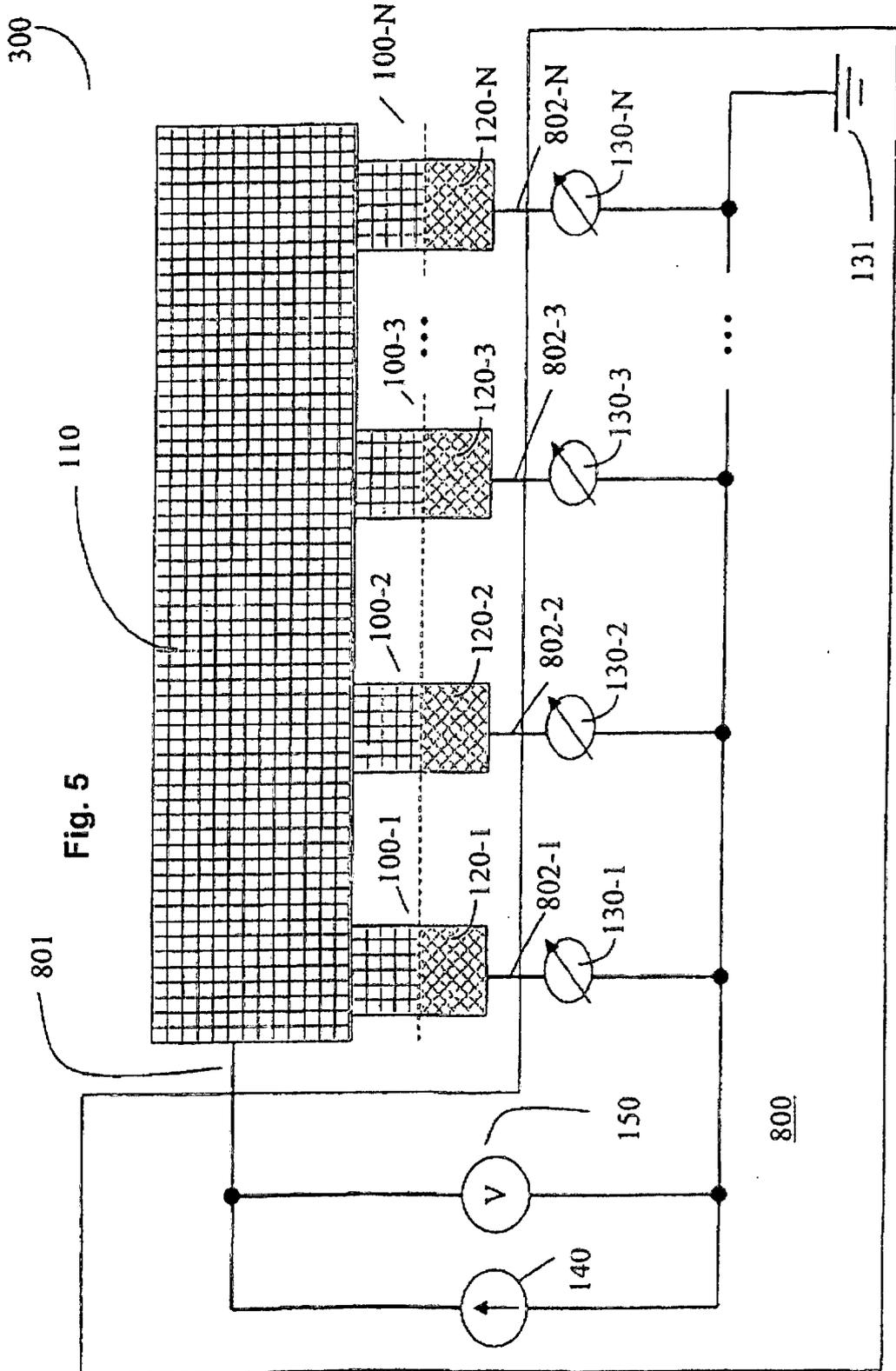
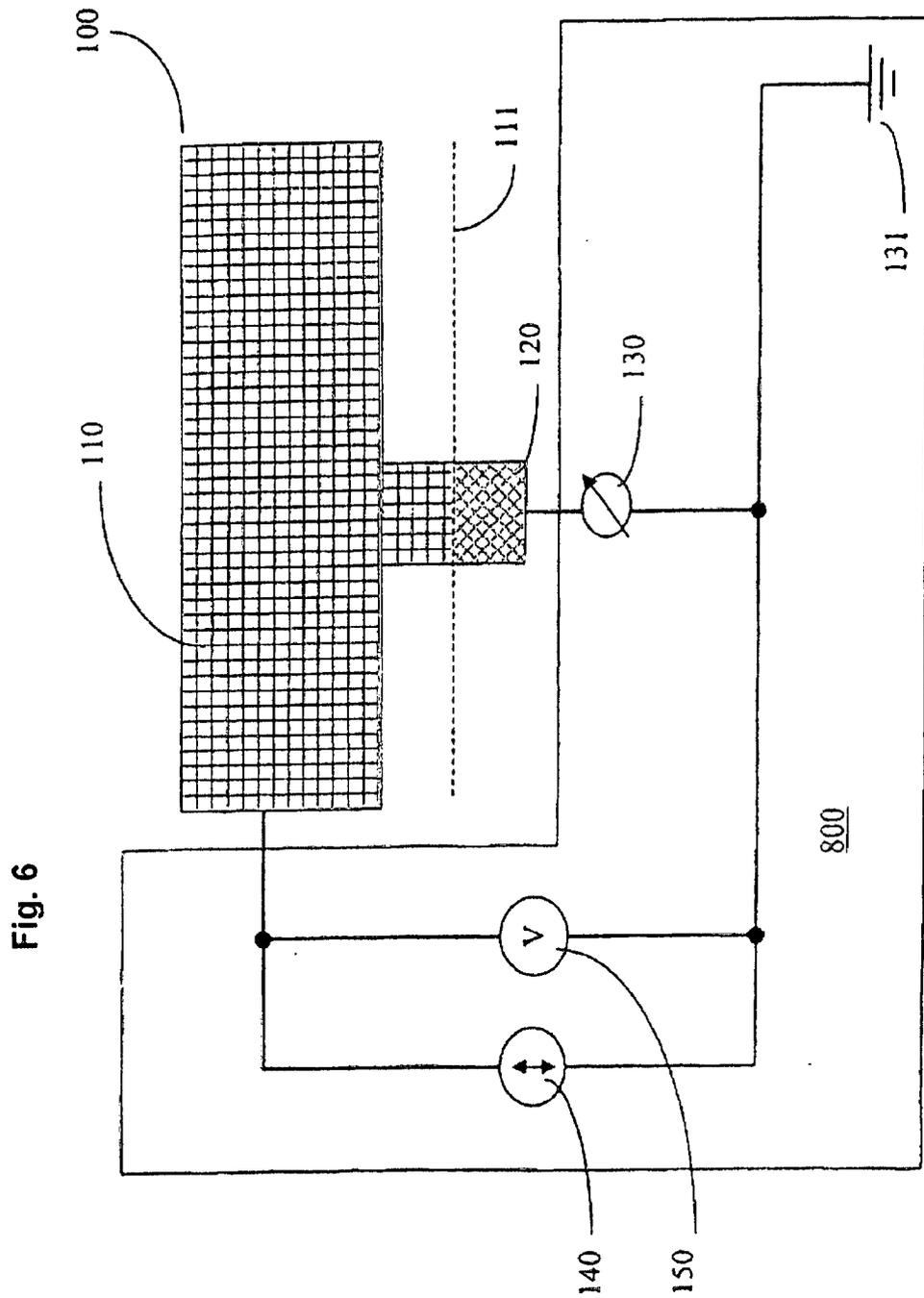
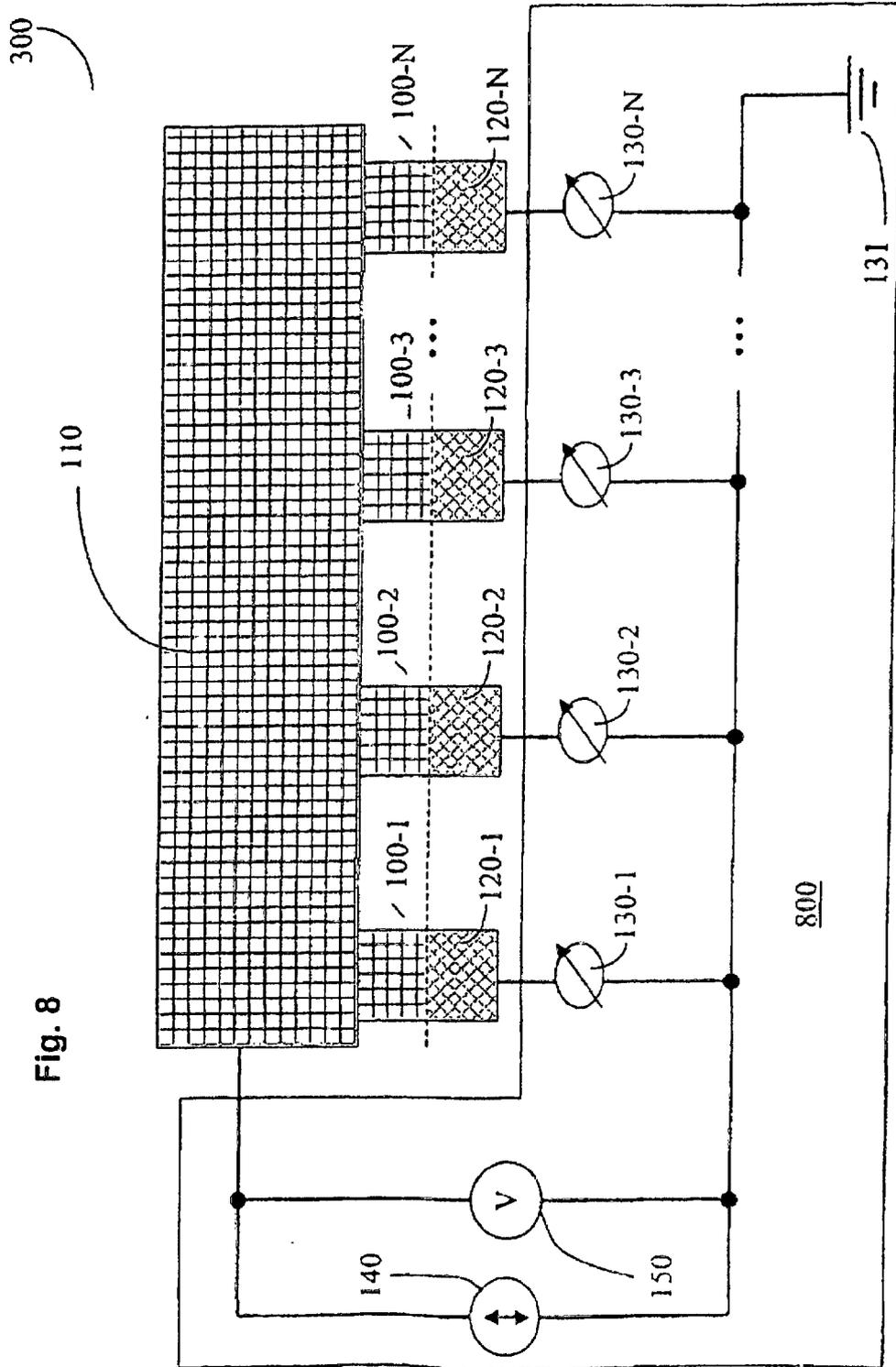
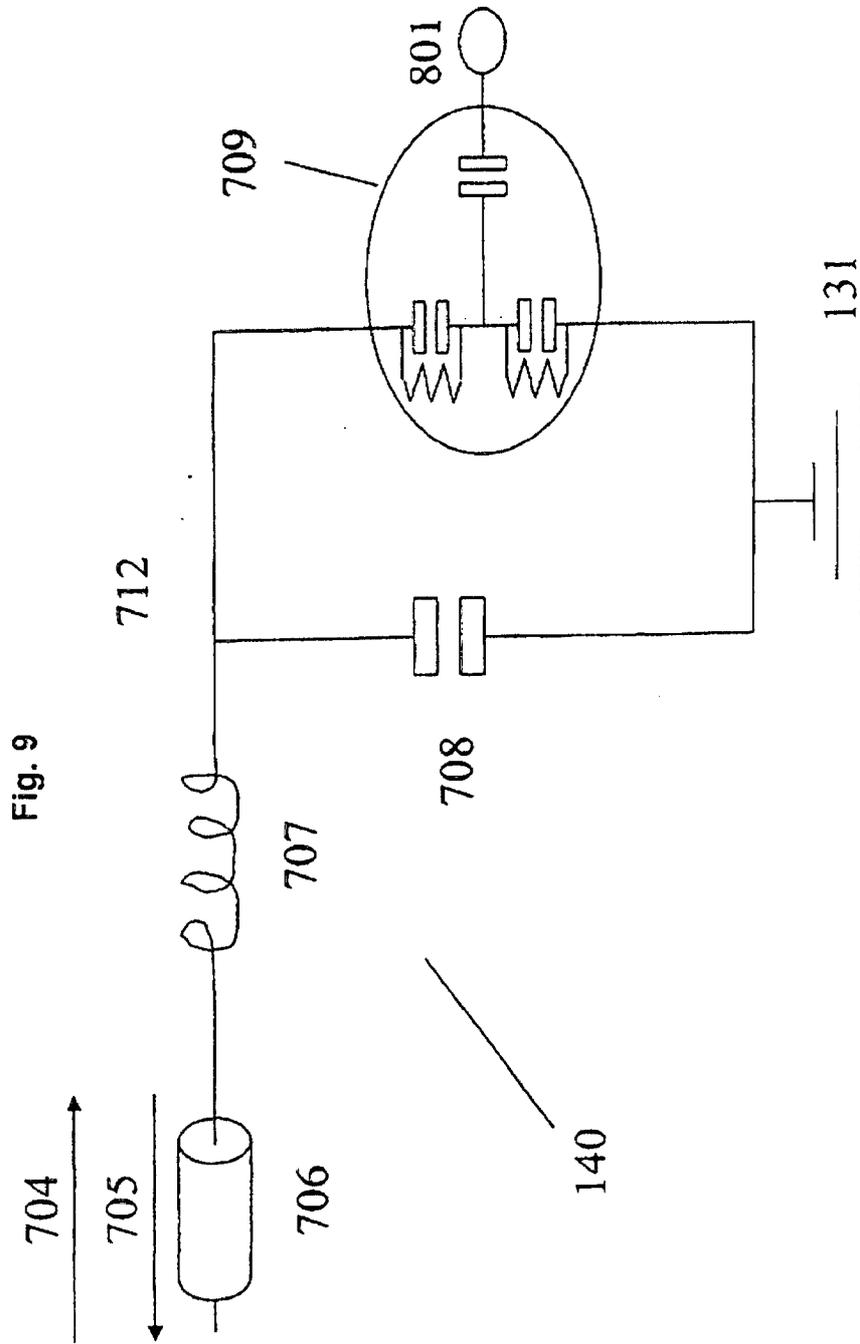


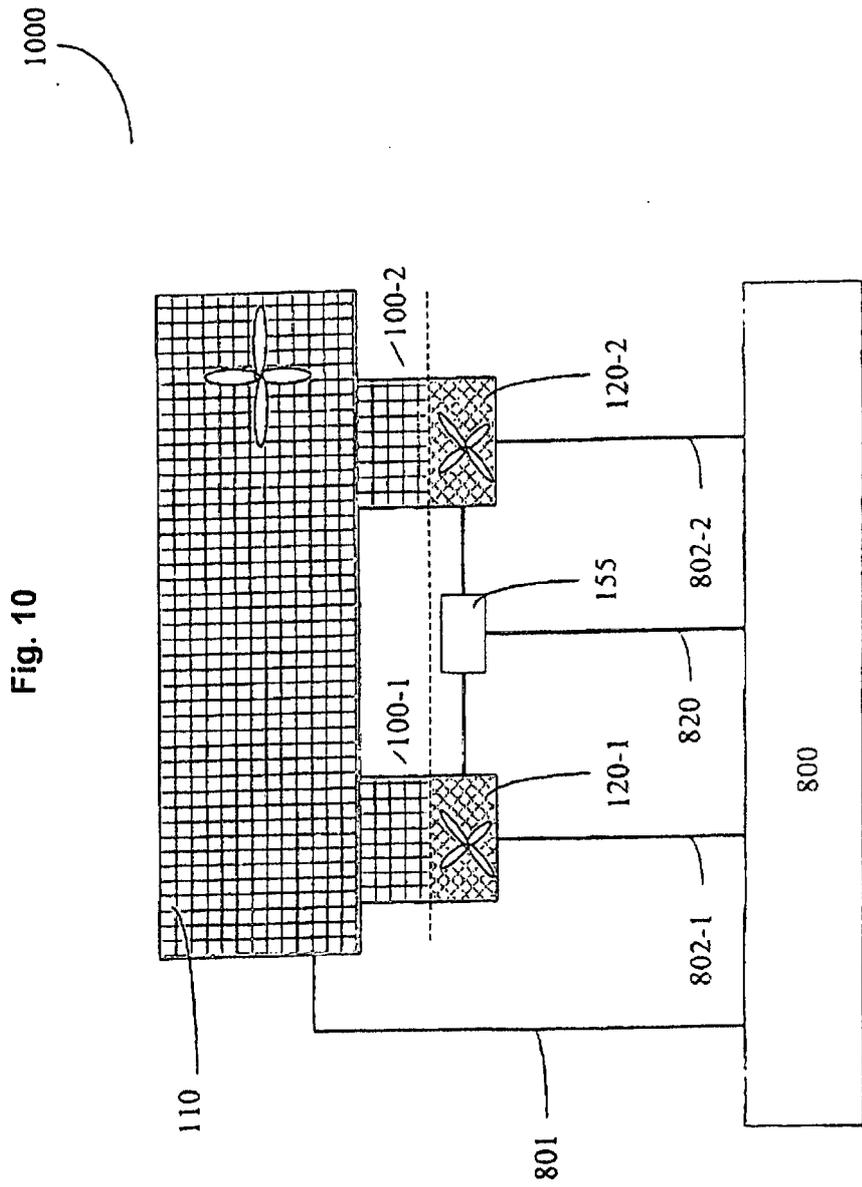
Fig. 4











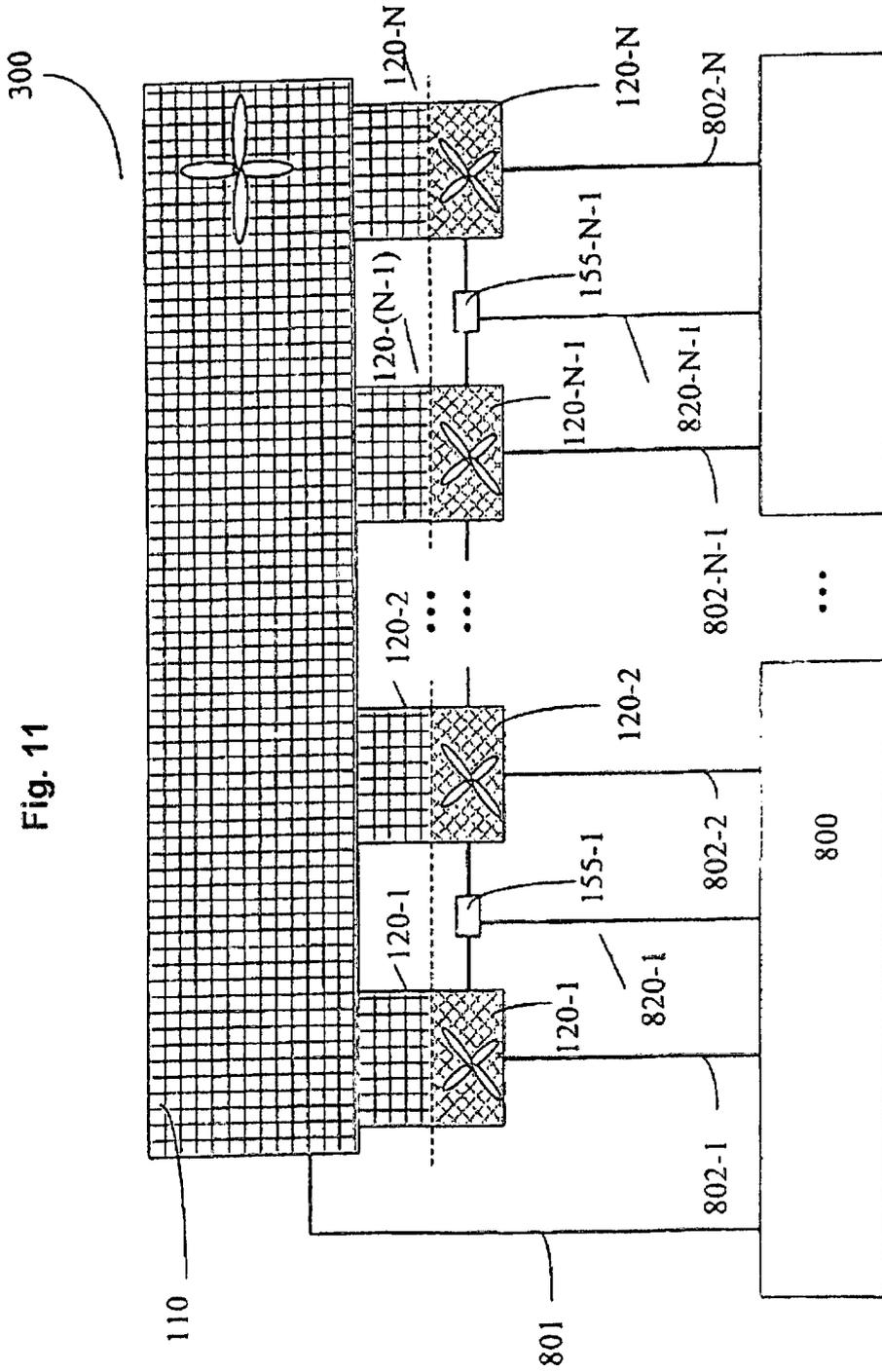


Fig. 12

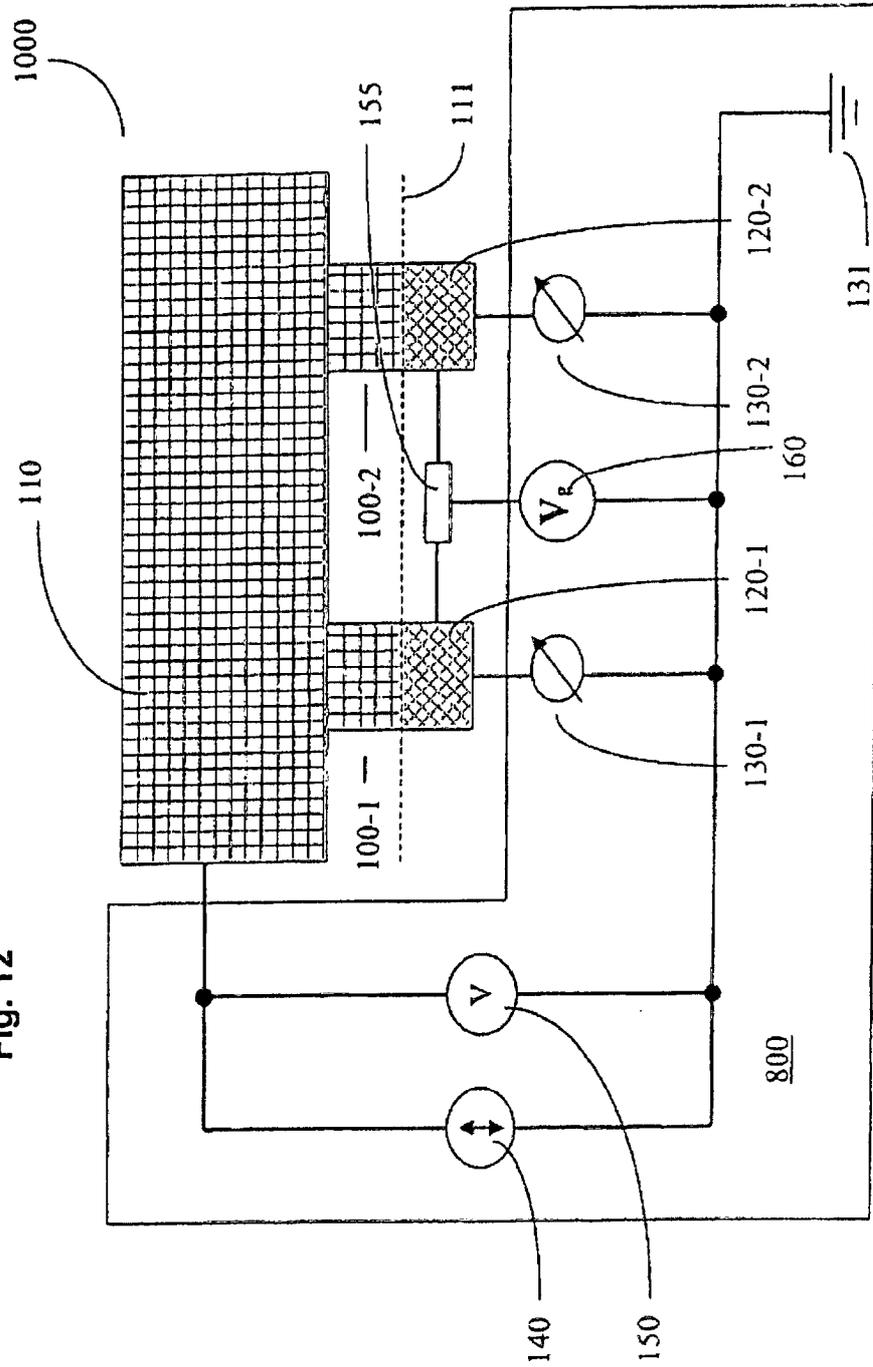
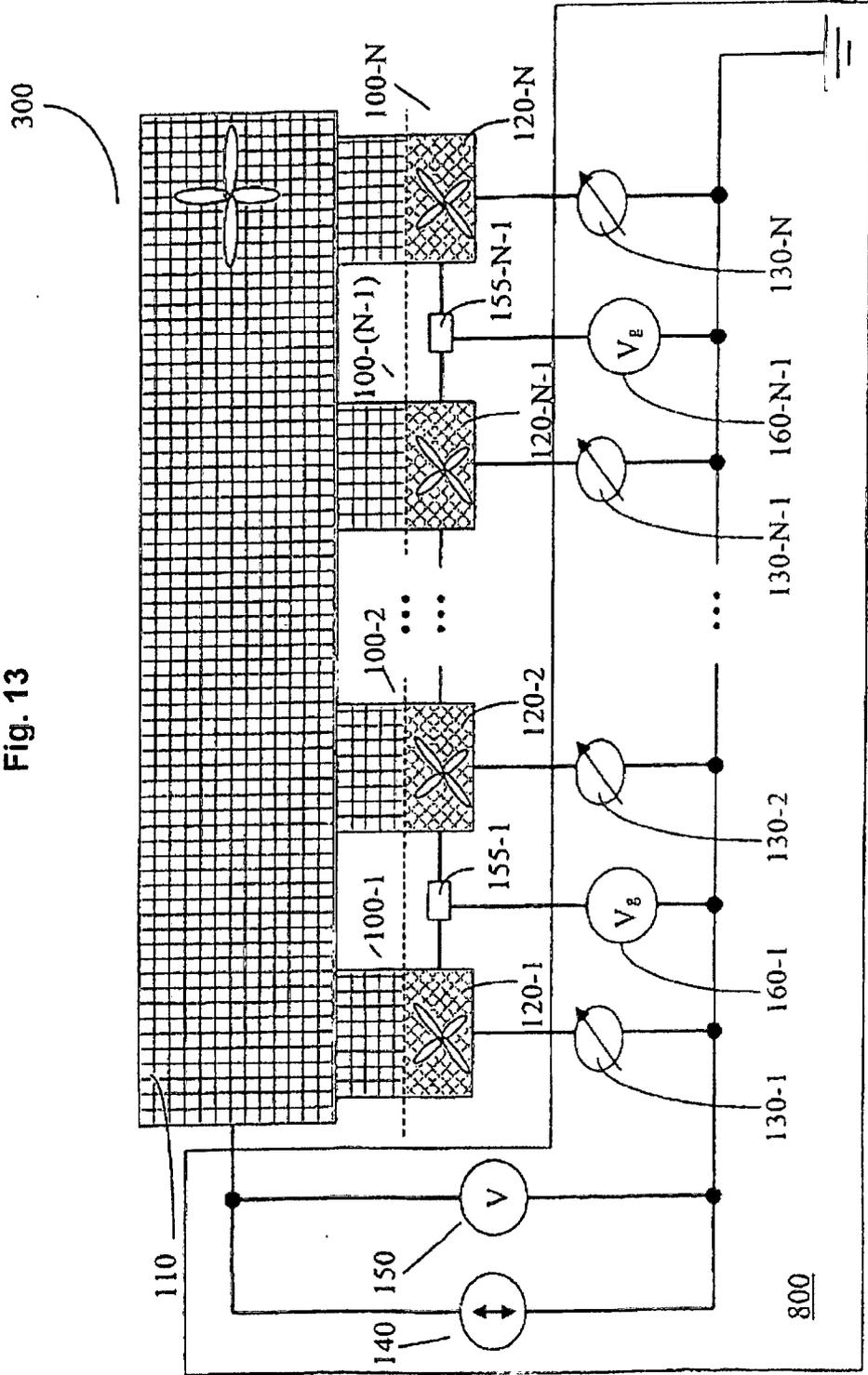


Fig. 13



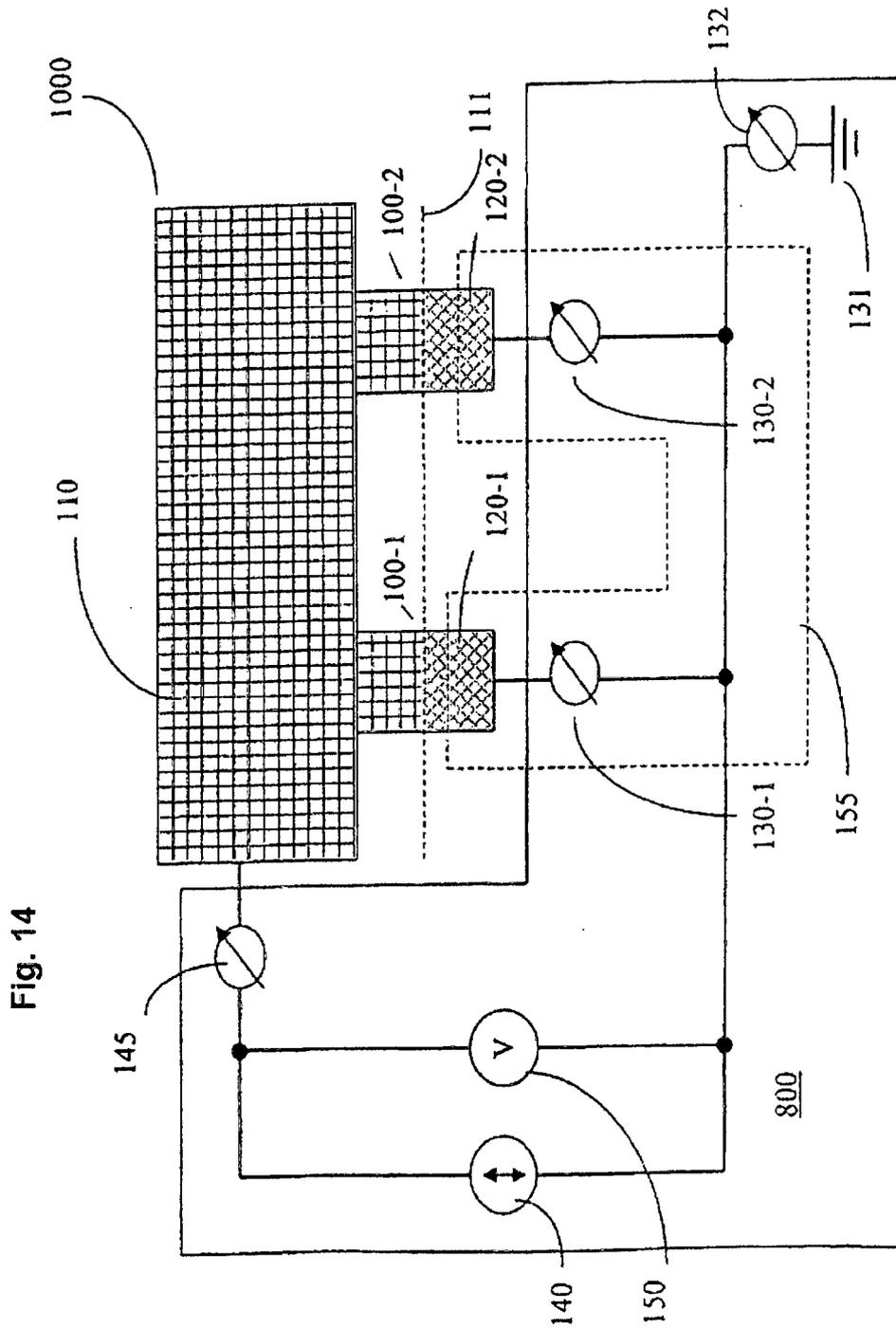


Fig. 15

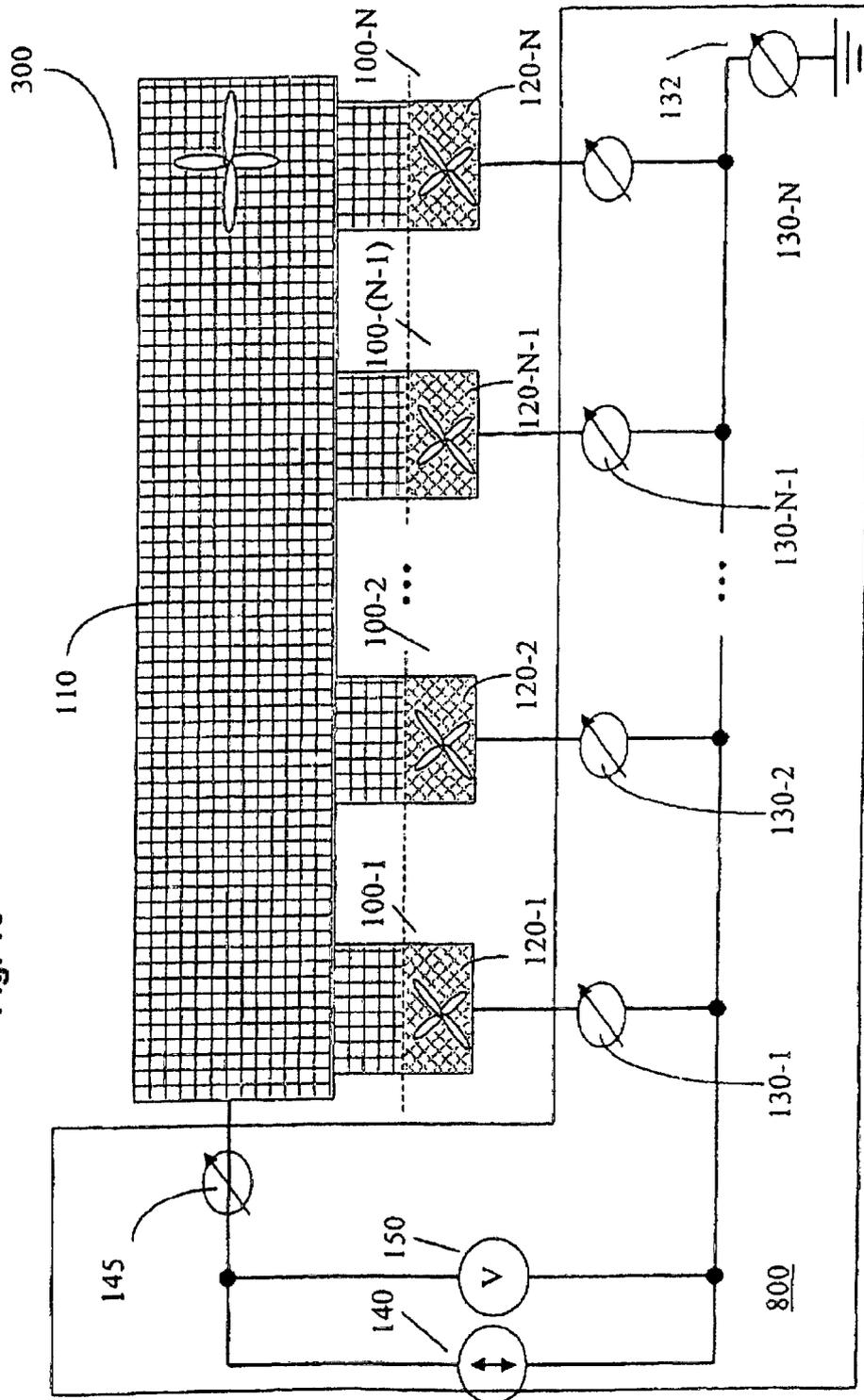


Fig. 16

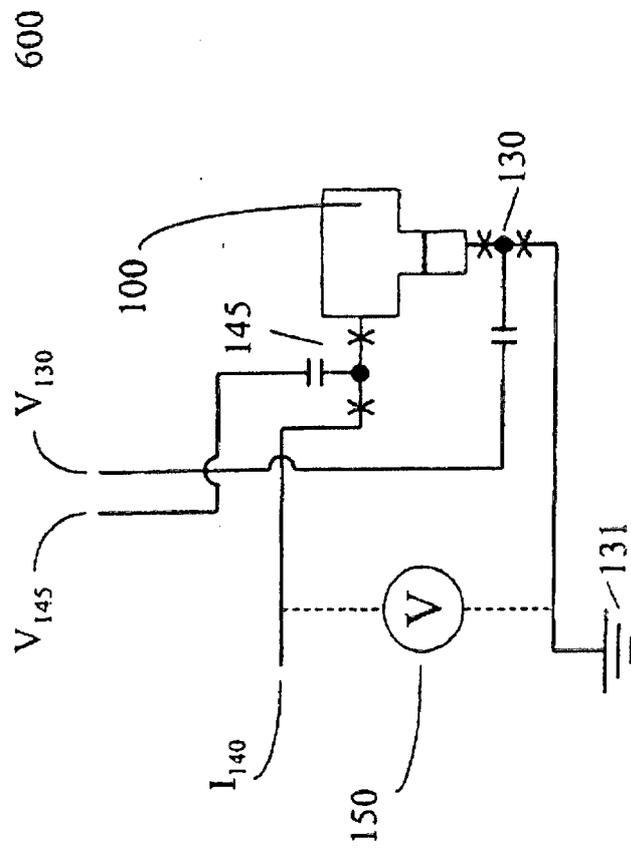


Fig. 18

