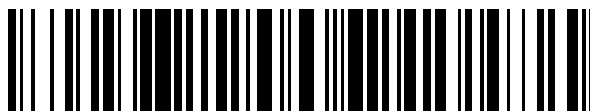


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 787 623**

51 Int. Cl.:

**G06N 10/00** (2009.01)

**H01L 25/16** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.11.2015 E 15192761 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.03.2020 EP 3016034**

54 Título: **Procesador cuántico**

30 Prioridad:

**03.11.2014 AU 2014904417**

**17.02.2015 AU 2015900532**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**16.10.2020**

73 Titular/es:

**NEWSOUTH INNOVATIONS PTY LIMITED (50.0%)  
Rupert Myers Building, Gate 14 Barker Street,  
UNSW**

**Sydney, NSW 2052, AU y  
UNIVERSITY OF MELBOURNE (50.0%)**

72 Inventor/es:

**FUECHLSE, MARTIN;  
HILE, SAMUEL JAMES;  
HILL, CHARLES DAVID;  
HOLLENBERG, LLOYD CHRISTOPHER  
LEONARD;  
HOUSE, MATTHEW GREGORY;  
PERETZ, ELDAD;  
ROGGE, SVEN y  
SIMMONS, MICHELLE YVONNE**

74 Agente/Representante:

**VIDAL GONZÁLEZ, Maria Ester**

**ES 2 787 623 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procesador cuántico

## 5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un aparato de procesamiento avanzado y a métodos para operar el mismo, particularmente, pero no exclusivamente, la invención se refiere a un aparato de procesamiento cuántico que puede controlarse para realizar un cálculo cuántico corregido por error.

10

## Antecedentes de la invención

La potencia y la capacidad de los componentes informáticos, tales como los microprocesadores y los circuitos de memoria, han aumentado durante los últimos 50 años, a medida que el tamaño de las unidades funcionales, tales como los transistores, ha disminuido. Sin embargo, esta tendencia ahora está llegando a un límite, ya que es difícil hacer más pequeñas las unidades funcionales actuales (tales como los MOSFET) sin afectar su funcionamiento.

15

Hay desarrollos en curso para implementar nuevos tipos de aparatos de procesamiento que pueden implementar cálculos más potentes que los procesadores actuales, mediante el uso de diferentes enfoques. Por ejemplo, están en desarrollo procesadores cuánticos que pueden realizar cálculos de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica. Los enfoques para los procesadores cuánticos se han desarrollado y descrito en varias publicaciones de patentes anteriores, que incluyen los documentos US 6472681 (Kane), US 6369404 (Kane), US 7732804 (Hollenberg y otros) y US 7547648 (Ruess y otros). Tal procesador cuántico avanzado promete paradigmas computacionales más allá de los dispositivos actuales. B. E Kane: "A silicon-based nuclear spin quantum computer", Nature, 14 de mayo de 1998, páginas 133-137, XP055253869, Londres, DOI: 10.1038/30156, describe un procesador cuántico basado en silicio que comprende una pluralidad de elementos cúbit y una pluralidad de miembros de control dispuestos para controlar la pluralidad de elementos cúbit, en donde la información se codifica en los espines nucleares de los átomos donadores.

20

25

Se han propuesto varias estructuras, materiales, arquitecturas y métodos de operación diferentes para implementar el cálculo cuántico. Una forma atractiva de fabricar bits cuánticos, por ejemplo, es usar el espín nuclear de donantes de fósforo ionizado en silicio, ya que ofrece una codificación cúbit casi perfecta de dos estados gracias a la estabilidad del núcleo <sup>31</sup>P. El control cuántico y la medición del conjunto y los espines nucleares de donantes individuales verifican los tiempos de coherencia cuántica extremadamente largos. Además, los dispositivos basados en donantes pueden fabricarse mediante el uso de técnicas de Microscopía de tunelización de escaneo (STM) con una precisión casi atómica.

30

35

Un procesador de ordenador cuántico universal a gran escala tendrá que comprender cientos de miles, preferentemente millones de cúbits. La arquitectura de un procesador cuántico universal requiere una caracterización compleja con un alto nivel de precisión y la capacidad de implementar protocolos de corrección de errores cuánticos (QEC).

40

45

Las posibles arquitecturas de procesadores cuánticos adecuadas para implementar el cálculo cuántico se han propuesto en la técnica. Sin embargo, estas arquitecturas se diseñan para abordar el control y la interacción de unos pocos cúbits y no abordan los estrictos requisitos de un procesador cuántico grande y escalable capaz de implementar el cálculo cuántico corregido por error en, potencialmente, millones de cúbits. Por ejemplo, si se necesitaran líneas de control separadas para abordar cada cúbit individual en una arquitectura de cálculo cuántico plana, el costo en términos del espacio requerido para las líneas de control se escalaría como  $O(n)$ , donde  $n$  es el número de cúbits.

Existe la necesidad en la técnica de un diseño de arquitectura de procesador cuántico que sea factiblemente escalable y capaz de implementar el cálculo cuántico corregido por error.

50

55

Un artículo de BE KANE ("A silicon-based nuclear spin quantum computer", Nature, 14 de mayo de 1998, páginas 133 a 137, XP055253869) propone un ordenador cuántico basado en silicio. Los donantes de P y los electrones en un huésped de silicio se separan por una barrera de las compuertas de metal en una superficie del huésped. Las compuertas "A" controlan la frecuencia de resonancia de los bits de espines nucleares; las compuertas "J" controlan el acoplamiento mediado por electrones entre los espines nucleares adyacentes. El artículo de Kane describe una serie de elementos cúbit dispuestos en una disposición vectorial unidimensional, y las compuertas J y A forman miembros de control para controlar los elementos cúbit.

## Resumen de la invención

60 Las reivindicaciones adjuntas definen todas las modalidades de la presente invención.

Las repeticiones de código de superficie de las operaciones entre los cúbits de datos y auxiliares forman la base de las mediciones del estabilizador en patrones geométricos bien definidos en toda la matriz. Ventajosamente, en la arquitectura descrita en la presente descripción, factores tales como la pureza del <sup>28</sup>Si y la homogeneidad del campo magnético pueden controlarse en alto grado, los cúbits de espines donante son altamente uniformes en términos de sus niveles de energía, potencial de confinamiento de electrones, interacciones espín-espín y respuesta a campos de control de espines

65

5 aplicados externamente ('global'). Las ventajas de la arquitectura descrita en la presente descripción incluyen un alto grado de control compartido. La arquitectura aprovecha el control de las primitivas TQEC mediante el uso de líneas de control multiplexadas. Además, la arquitectura descrita en la presente descripción permite evitar la ingeniería de función de onda de electrón y las interconexiones cuánticas. La complejidad de todas las operaciones cuánticas se destila a la operación de cargar y descargar electrones hacia y desde los átomos donadores.

10 La arquitectura permite realizar las operaciones requeridas en la extracción del síndrome de código de superficie y las operaciones lógicas corregidas por error de alto nivel con errores operativos que caen por debajo del umbral de código de superficie apropiado.

15 En algunas variaciones del procesador, cada cúbit de datos y auxiliar puede codificarse en un sitio donante que comprende una pluralidad de átomos donadores dispuestos en un grupo. El cúbit en este caso podría codificarse mediante el uso de combinaciones de propiedades cuánticas de los átomos donadores en el grupo.

15 Breve descripción de los dibujos

Las características y ventajas de la presente invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción de modalidades de la misma, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que;

20 Las Figuras 1 a la 3 son representaciones esquemáticas de una arquitectura de un procesador cuántico de acuerdo con ejemplos;

La Figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para cargar un electrón en un átomo donador o grupo;

25 La Figura 5 es una ilustración esquemática de una serie de señales aplicadas a las líneas de control de la arquitectura descrita 3 para cargar/descargar un electrón hacia/desde un átomo donador o grupo;

La Figura 6 es una ilustración esquemática del funcionamiento de la arquitectura durante la carga/descarga en un átomo donador específico;

30 Las Figuras 7 (a) y (b) son ilustraciones esquemáticas de una señal y una estructura cuántica simplificada adecuada para la carga/descarga;

35 La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para realizar una compuerta cuántica Pauli X en la arquitectura descrita

La Figura 9 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para realizar una compuerta CNOT en la arquitectura descrita;

40 La Figura 10 es un diagrama de compuerta cuántica que representa una compuerta cuántica CNOT;

La Figura 11 es una ilustración esquemática de una sección de la arquitectura descrita adecuada para realizar una compuerta CNOT;

45 La Figura 12 muestra una serie de representaciones esquemáticas de la arquitectura durante la carga/descarga para la extracción del síndrome en átomos específicos a través de la matriz cúbit;

La Figura 13 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para realizar una extracción de síndrome;

50 La Figura 14 muestra resultados de simulaciones de control de compuerta electrostática para direccionamiento cúbit;

La Figura 15 muestra los resultados de la simulación de activación cúbit de fase coincidente (PM) y la compuerta CNOT; y

55 La Figura 16 muestra una arquitectura alternativa del procesador cuántico de acuerdo con los ejemplos.

Descripción detallada de las modalidades

60 Las modalidades de la presente invención se refieren a un procesador cuántico para implementar el cálculo cuántico corregido por error. En particular, las modalidades se refieren a una arquitectura de cálculo cuántico realizada en una red semiconductor y a métodos para controlar la arquitectura para implementar el cálculo cuántico corregido por error cuántico topológico (TQEC).

65 Una pluralidad de átomos donadores se disponen en una disposición de matriz bidimensional en silicio. En algunas variaciones del procesador cuántico, los cúbits pueden codificarse en sitios donantes que comprenden una pluralidad de

átomos donadores dispuestos en un grupo. El cúbit en este caso se codifica mediante el uso de combinaciones de propiedades cuánticas de los átomos donadores en el grupo.

5 Los elementos cúbit de datos se codifican en un primer conjunto de la pluralidad de átomos donadores y los átomos donadores restantes se disponen para facilitar la corrección de errores cuánticos. Los cúbits codificados en el segundo conjunto de átomos donadores también se denominan en la presente descripción cúbits 'auxiliares'.

10 Los cúbits de datos y auxiliares se codifican en el espín nuclear de los átomos donadores respectivos. Los electrones donantes y los espines nucleares pueden rotarse simultáneamente mediante el uso de un campo magnético global que puede aplicarse externamente a toda la arquitectura. Esto proporciona una ventaja sustancial con respecto a las arquitecturas que requieren la aplicación local (a cada cúbit) del campo magnético.

15 Una estructura de control se dispone en el silicio para interactuar con los cúbits de datos y los cúbits auxiliares. La disposición de la estructura de control permite controlar una pluralidad de cúbits simultáneamente. En particular, los cúbits pueden controlarse simultáneamente en patrones distribuidos a través de la matriz. La estructura puede controlarse para cargar o descargar un electrón hacia o desde cada uno de los átomos donadores y simultáneamente en múltiples átomos donadores.

20 Con referencia ahora a la Figura 1, se muestra una implementación de una arquitectura de cálculo cuántico de silicio 100. La estructura se forma en un sustrato de silicio 28 ( $^{28}\text{Si}$ ) isotópicamente purificado 102. Una pluralidad de átomos de fósforo 104 se incorporan en la red de silicio, que en algunos casos puede tener enlaces tensos con al menos 2 % de deformación.

25 La deformación mitiga la variación de la fuerza de la interacción de intercambio provocada por la interferencia entre los seis estados degenerados del valle y permite la reducción de la interacción hiperfina.

30 Dos conjuntos de miembros de control, proporcionados en la forma de las líneas de control alargadas 108 y 106, se extienden a través de la arquitectura. Las líneas de control 106 se disponen en un plano por encima del plano que comprende los átomos donadores y las líneas de control 108 se disponen en un plano por debajo del plano que comprende los átomos donadores. Las líneas de control 106 y 108 se disponen perpendicularmente entre sí, en una configuración entrecruzada. En algunas implementaciones, las líneas de control pueden cruzarse en un ángulo diferente de 90°. Las líneas de control 106 y 108 no se cruzan físicamente, sin embargo, definen puntos de intersección donde pasan a través de dos porciones de la red alineadas verticalmente. Alrededor de algunas de estas intersecciones se forman los elementos de control proporcionados en la forma de una isla de silicio fuertemente dopado 110. Cada isla forma un único transistor de electrones (SET) 112 con los miembros de control respectivos dispuestos encima y debajo de la isla. Un par de estos miembros de control actúa como fuente y drenaje del transistor, y otro par actúa como compuertas del transistor.

40 Con referencia ahora a la Figura 2, se muestra una representación despiezada 200 de la estructura de la Figura 1. La estructura 200 se despieza en tres planos de silicio diferentes. Una posible técnica para fabricar la estructura es comenzar desde una oblea de silicio puro y fabricar las estructuras en cada plano explotando las capacidades litográficas de un microscopio de tunelización de escaneo junto con la epitaxia de silicio. En funcionamiento, todo el dispositivo se enfría al régimen mK, opera en un campo magnético de aproximadamente  $B = 2\text{T}$  con un control de RF y MW aplicado externamente (global).

45 En la estructura 200, las líneas de control en el plano inferior se separan en dos grupos intercalados 209 y 208. Las líneas de control 209 actúan como drenajes de los SET y las líneas de control 208 actúan como compuertas de los SET 112. Una configuración similar se muestra para las líneas de control en el plano superior 207 y 206, que actúan respectivamente como fuentes y compuertas de los SET. Cada SET 112 interactúa con uno o más átomos donadores 104 a través de la isla de control respectiva 110. En el ejemplo descrito, cada isla 110 se configura para interactuar con cuatro átomos donadores 104 para formar una celda unitaria de la arquitectura. Los SET 112 pueden controlarse, al aplicar señales eléctricas a las líneas de control 206 a la 209, para cargar o descargar electrones en cada átomo donador 104 en la arquitectura o controlar la orientación del espín de un electrón o núcleo de uno o más átomos donadores. Además, la configuración de los átomos donadores 104 y las líneas de control permite la carga o descarga de electrones en múltiples átomos donadores dispuestos en patrones predeterminados simultáneamente. Por ejemplo, los electrones podrían cargarse en una pluralidad de átomos donadores dispuestos en un patrón cuadrangular.

60 Con referencia ahora a la Figura 3, se muestra una vista adicional 300 de un átomo donador en un estado de memoria cúbit con líneas de control e isla de control respectivas. En este estado de "memoria", la interacción hiperfina es de manera natural exactamente cero, ya que no hay electrones presentes. El diagrama de energía 320 muestra los niveles de energía relevantes para el control de ESR/NMR. Los cuatro niveles de energía tienen cuatro transiciones permitidas, dos transiciones de RF NMR y dos transiciones ESR de microondas. Cada una de estas transiciones puede dirigirse individualmente para realizar rotaciones de un solo cúbit e interacciones de espín electrón-nuclear.

65 Al cargar selectivamente electrones en átomos donadores específicos, las operaciones de compuertas cuánticas pueden realizarse de forma selectiva y simultánea a través de la arquitectura del procesador cuántico.

Al cargar un electrón en una ubicación de donante dada, al pulsar las compuertas correspondientes, se dota que un donante con una interacción hiperfina distinta de cero entre el espín nuclear y de electrón inmediatamente después de cargar el electrón. Esto cambia la frecuencia de resonancia del espín nuclear del donante dado. Por lo tanto, un conjunto  
5 dado de cúbits puede ponerse en resonancia de forma independiente con los campos globales RF/MW para afectar una compuerta de un solo cúbit deseada. Este es un cambio digital altamente uniforme en el valor hiperfino, y se rige por el proceso de tunelización del donante-isla, que puede diseñarse con precisión atómica y caracterizarse en la fase de configuración del sistema.

10 En el estado de memoria, el espín nuclear de cúbit está lejos de la resonancia y no se afecta por los campos de control global.

Las compuertas de dos cúbit entre cúbits de espines nucleares vecinos más cercanos también se controlan mediante operaciones de carga/descarga de electrones. En ausencia de electrones unidos, la interacción entre espines nucleares en estas separaciones es insignificante. Sin embargo, cuando los electrones se cargan en átomos adyacentes, además de cualquier acoplamiento de intercambio sentido por los electrones, la interacción dipolar espín-espín aumenta en un factor de  $(g\mu_B/g_n\mu_n)^2 \approx 3 \times 10^6$  al cambiar efectivamente la interacción entre cúbits de forma digital. Las compuertas lógicas de dos cúbits pueden descomponerse en una serie bien definida de interacciones de un solo cúbit y dos cúbits en presencia de los campos de control global. Por lo tanto, todas las compuertas, la inicialización y la lectura se controlan en última instancia mediante el conjunto de compuertas de celda unitaria y pueden llevarse a cabo con un alto grado de paralelización.

En un estado ionizado, los espines nucleares de donantes bien separados en un material de silicio isotópicamente puro tienen una interacción insignificante con los espines de electrones o con los espines nucleares de donantes cercanos. Como consecuencia, no hay fugas de información de cúbit a estados orbitales superiores, y dado que el átomo donador se fija en el espacio, la pérdida total de cúbit, que puede afectar severamente el umbral TQEC, es cero. El tiempo T2 del espín nuclear es extremadamente largo y se ha medido que es 39 minutos. En el estado de memoria cúbit (inactivo) los donantes están ionizados. En esta situación, los espines nucleares preceden de acuerdo con el Hamiltoniano Zeeman.

30 
$$H^F_{inact} = -g_n\mu_n B_z Z_n$$

Aquí  $g_n$  es el factor g nuclear,  $\mu_n$  es el momento dipolar nuclear,  $B_z$  es el campo magnético aplicado (a lo largo del eje z), y  $Z_n$  es el operador Z de Pauli que se aplica al espín nuclear. En general en lo sucesivo, los operadores X, Y y Z se refieren a las matrices Pauli correspondientes. Los subíndices e y n se refieren a los espines electrónicos y nucleares. La división de energía de los estados cúbit, de un donante ionizado 104 es uniformemente  $\Delta E_{inact} = 2g_n\mu_n B_z$ .

Con referencia ahora a las Figuras 4 a la 6, se muestra respectivamente un diagrama de flujo que enumera las etapas necesarias para cargar un electrón en un átomo donador mediante el uso de la arquitectura descrita anteriormente, una serie de señales eléctricas aplicadas a las líneas de control usadas para la carga y una vista esquemática de la arquitectura que muestra las líneas de control y los átomos donadores involucrados en el proceso.

Con la colocación del donante a una precisión de sitio atómico casi único, se espera que el tiempo de tunelización entre el donante y la isla SET pueda diseñarse desde un intervalo tan bajo como nanosegundos a milisegundos (en dependencia de la separación de las islas). Sin embargo, la tunelización cuántica es un proceso naturalmente estocástico. Cuando el electrón está presente en el donante, hay una acumulación de fase adicional debido a la interacción hiperfina. Si no se conoce el momento preciso en el que los electrones hacen un túnel hacia el donante, entonces el cambio abrupto en la fuerza de la hiperfina conduce a una acumulación de fase para el espín nuclear, y es una fuente importante de desfase en escalas de tiempo tan cortas como 1 ns.

Para superar esto, se evita la tunelización en momentos que conducen a una diferencia de fase entre cúbits de espines nucleares cargados e ionizados. Hay una diferencia en la frecuencia de aproximadamente  $f_{dif} = 2A/h$  entre la frecuencia de precesión de espines nucleares de los espines nucleares cargados y no cargados. En cada período de  $1/f_{dif}$  hay una ventana corta cuando los cúbits de espines nucleares ionizados y cargados no tienen diferencia de fase. Si la arquitectura se controla para monitorear cuando se permite energéticamente que el electrón haga un túnel al aplicar pulsos de carga suficientemente cortos en las compuertas de control relevantes, puede inducirse la tunelización sincrónica en el ciclo de fase y puede mitigarse el error de fase. Esto se conoce como un procedimiento de carga o descarga de carga semideterminista (SDL) o de fase coincidente (PM).

Durante el protocolo de fase coincidente, el sistema se mantiene en una configuración 'bloqueada' donde no puede producirse la tunelización entre pulsos de carga. Esto puede lograrse mediante una polarización de voltaje adecuada combinada con la ingeniería de tamaño de la isla y sus estados orbitales. Bajo estas condiciones, no es necesario saber exactamente cuándo el electrón hizo un túnel, solo que la secuencia de carga es lo suficientemente larga como para que la probabilidad de tunelización sea alta con respecto al umbral de error del código de superficie. También puede usarse una gama de acoplamientos entre los espines de electrones, mediante el uso de pulsos compuestos relevantes. Después de la aplicación de la secuencia de compuerta cúbit, es posible verificar que el electrón se ha cargado correctamente y que

la compuerta se ha producido al medir el espín del electrón como un auxiliar. Además, la aplicación de la deformación de la red puede usarse para (a) mitigar la variación de la fuerza de la interacción de intercambio provocada por la interferencia entre los seis estados degenerados del valle y (b) reducir la interacción hiperfina, que disminuye los requisitos de control estrictos para la secuencia de pulsos SDL.

Se proporciona una isla de control cerca del átomo donador para formar un pozo potencial que comprende una pluralidad de niveles de energía y la separación de energía de los niveles de energía es tal que permite la tunelización cuántica de electrones con diferentes espines entre el átomo donador y el pozo potencial. La secuencia SDL requiere islas de control diseñadas o islas de compuerta pequeñas separadas controladas por las líneas de control de compuerta con niveles suficientemente discretos en comparación con  $k_B T$  y capacidad de sintonización del nivel  $D^0(\downarrow)$  entre los niveles llenos/sin llenar de la isla. Los diagramas muestran estos niveles: las configuraciones de medición de espín hacia arriba y espín hacia abajo, la condición bloqueada tanto para los estados cargados como ionizados, y la condición de carga para los estados ionizados y ya cargados.

Cuando se carga el electrón, la frecuencia de resonancia del espín nuclear cambia en una cantidad constante (es decir, digital) dada por la interacción hiperfina  $A$ , de manera que el Hamiltoniano de un cúbit cargado (no inactivo) se convierte en:

$$H_{cargado} = -g_n \mu_n B_z Z_n + g \mu_B B_z Z_e + A \sigma_n \sigma_e$$

La fuerza de la interacción hiperfina es una constante para los donantes de P en silicio y está dada por  $A = 8\pi/3 g \mu_B B_n Z_n |\psi(0)|^2 = 4,2 \text{ mT}$  ( $4A = 117 \text{ MHz}$ ). Este Hamiltoniano de cúbit cargado puede diagonalizarse directamente en el espacio de estados  $|ne\rangle = (|0\uparrow\rangle; |0\downarrow\rangle; |1\uparrow\rangle; |1\downarrow\rangle)$ . En primer orden las energías correspondientes son:

$$E_{|0\uparrow\rangle} = g \mu_B B_z - g_n \mu_n B_z + A$$

$$E_{|1\uparrow\rangle} = g \mu_B B_z + g_n \mu_n B_z - A$$

$$E_{|1\downarrow\rangle} = -g \mu_B B_z + g_n \mu_n B_z + A$$

$$E_{|0\downarrow\rangle} = -g \mu_B B_z - g_n \mu_n B_z - A.$$

Si los electrones se cargan en el estado  $D^0$  hacia abajo del espín, los cúbits de los espines nucleares objetivo tienen una frecuencia resonante de  $\Delta E_{cargado} = E_{|1\downarrow\rangle} - E_{|0\downarrow\rangle} = 2(g_n \mu_n B_z + A) + O(A^2/\mu_B B)$ , desintoniza de los donantes ionizados. Para generar operaciones de un solo cúbit, se aplica un campo magnético resonante:

$$H_{AC} = g \mu_B B_{AC} (X_e \cos(\omega t) + Y_e \text{ sen}(\omega t)) - g_n \mu_n B_{AC} (X_n \cos(\omega t) + Y_n \text{ sen}(\omega t))$$

donde  $\omega$  es la frecuencia del campo aplicado,  $B_{AC}$  es la fuerza del campo y  $g_n, \mu_n$  gobiernan la frecuencia de precesión de espín nuclear para el fósforo en silicio. Un campo magnético resonante,

$B_{AC}$ , sintonizado a la frecuencia de radio correspondiente a los donantes cargados, puede implementar rotaciones de un solo cúbit en espines nucleares específicamente objetivos. De manera similar, las transiciones de los espines de electrones podrían controlarse a través de un campo de microondas resonante global. Este campo de control oscilante puede aplicarse globalmente, a todos los electrones y núcleos en todo el ordenador al mismo tiempo. Dado que los cúbits de espines nucleares espectadores (inactivos) se ionizan (donantes de P+) y se desintonizan significativamente de la frecuencia de resonancia de estos cúbits dirigidos de manera que, por lo tanto, no se afectan por estas operaciones.

Para abordar un cúbit de espín nuclear específico, un electrón se carga semideterminísticamente en cada uno de estos donantes desde las islas SET cercanas mediante la aplicación de las señales eléctricas 602 y 604 a las cuatro líneas de control vecinas más cercanas 206 a la 209.

Con referencia ahora a la Figura 5, se muestra un diagrama 500 que ilustra las señales aplicadas a las líneas de control 206 a la 209 para implementar el método de la Figura 400. Puede implementarse una carga y descarga semideterminista de electrones de los átomos donadores 604, pueden aplicarse voltajes de compensación a los controles vecinos más próximos.

Para eliminar una porción de la naturaleza estocástica del fenómeno de tunelización de electrones del SET 606 al átomo donador 604, en la etapa 405, las líneas de control 206 a la 209 se polarizan en una primera configuración, que permite la tunelización cuántica del electrón. La configuración de polarización se mantiene durante el primer período de tiempo. Hay una probabilidad dada de que el electrón se haya tunelizado en el primer período de tiempo. Las líneas de control 206 a la 209 se cambian entonces, etapa 410, de la primera configuración a una segunda configuración que minimiza la probabilidad de tunelización. Esta secuencia de conmutación se realiza durante un número predeterminado de veces que se basa en el nivel de confianza requerido para la tunelización cuántica.

En el diagrama 500, las señales son representaciones esquemáticas de la señal real que se aplicaría a las líneas de control 206 a la 209.

El número de ciclos de conmutación puede determinarse en función del nivel de confianza requerido por la arquitectura para la tunelización. Un mayor nivel de confianza permite una menor probabilidad de incurrir en un error. Sin embargo, la arquitectura descrita permite la corrección en caso de que ocurra un error. Por otro lado, aumentar el número de ciclos por encima de un cierto umbral puede degradar la operación cuántica coherente al alargar el tiempo total de la compuerta, durante el cual puede ocurrir la decoherencia. El primer período de tiempo (carga/descarga) 502 es más corto que el segundo período de tiempo y, en el caso de interacción hiperfina predominante, está en el intervalo de 0,1 ns y 0,5 ns. El segundo período de tiempo (interacción) se selecciona de manera que el espín nuclear del donante experimente un cambio de fase relativo de  $2\pi$  o múltiplos del mismo para minimizar el error introducido por el desfase inducido de los cúbits. El segundo período de tiempo es entre 8 ns y 40 ns, en el caso de interacción hiperfina predominante. Otros períodos de tiempo pueden usarse en caso de un tipo o fuerza diferente de la interacción.

Aunque está presente el desfase de los espines de electrones y nucleares, la fuente dominante de error surge del desfase inducido debido a la carga y descarga del espín de electrones del donante. Se simuló  $n$  pulsos de un solo cúbit en presencia del desfase nuclear y de electrones. En el caso ideal, sin tener en cuenta el error de carga, estas compuertas también toman un tiempo de aproximadamente  $t \approx 21 \mu\text{s}$ , y tienen un error de decoherencia y errores pulsantes tan poco como  $5 \times 10^{-5}$ . Las rotaciones de ángulo arbitrarias alrededor de dos ejes independientes permiten la capacidad de realizar cualquier rotación de un solo cúbit, con un nivel de error similar. Sin embargo, cuando se considera la carga (que incluye tanto el desfase debido a la carga de un electrón como la probabilidad de no cargar un electrón), una compuerta de un solo cúbit tiene un error de aproximadamente  $2 \times 10^{-4}$ , y un tiempo de aproximadamente 1,1 ms, ambos dominados por el proceso de carga y descarga de electrones. Con referencia ahora a la Figura 7(a), se muestra esquemáticamente la ubicación de los puntos de polarización requeridos en un diagrama de carga correspondiente a las configuraciones de memoria (inactiva), activa, carga, descarga y lectura. En la Figura 5 se muestra una secuencia de carga/control/descarga/lectura en la que los voltajes se pulsan para permitir solo la tunelización entre las islas SET y los donantes en momentos que están bloqueados en fase a la frecuencia hiperfina para evitar la acumulación de fases desconocidas en el espín nuclear. La Figura 7(b) muestra esquemas de los niveles de energía de las líneas donante, islas SET y S/D para cada caso: las configuraciones de memoria (inactiva), carga/lectura, descarga y activas. Las líneas punteadas indican las energías de transición SET cuando hay un electrón presente en el donante, y las líneas continuas indican las energías de transición cuando el donante está ionizado.

Con referencia ahora a la Figura 8, se muestra un diagrama de flujo 800 que describe una serie de etapas que pueden realizarse para llevar a cabo una compuerta cuántica Pauli X en un solo cúbit en la arquitectura descrita anteriormente. La compuerta puede realizarse de la siguiente manera:

cargar un electrón en un átomo donador (etapa 805);

aplicar un campo electromagnético al átomo donador en resonancia con el espín nuclear del átomo donador (etapa 810);

permitir una rotación coherente del espín nuclear por un ángulo  $\theta = \pi$  (etapa 815);

eliminar el campo electromagnético (etapa 820); y

descargar el electrón del átomo donador (etapa 825).

Durante la etapa 825, puede medirse el estado del espín del electrón para verificar su orientación y determinar posibles errores en la operación de compuerta Pauli X. La operación de compuerta Pauli X puede realizarse, potencialmente al mismo tiempo, en una pluralidad de átomos donadores 104 distribuidos a través de la arquitectura y preseleccionados mediante la carga de electrones.

Para valores típicos, y fuerza del campo AC de  $B_{AC} \approx 1 \text{ mT}$ , el tiempo de rotación  $\pi$  correspondiente es de aproximadamente  $20 \mu\text{s}$ . Las rotaciones de ángulo arbitrarias del espín nuclear alrededor del eje y también pueden lograrse con un campo AC de RF  $\pi/2$  fuera de fase con las rotaciones del eje x. Mediante el uso de combinaciones de estas dos rotaciones de ángulo arbitrarias alrededor de dos ejes ortogonales, puede lograrse cualquier rotación de un solo cúbit del espín nuclear mediante el uso de este paradigma de control global de carga. Esto incluye la capacidad de

implementar pulsos de control robustos tal como BB1 para absorber errores de control y/o fabricación, y pulsos de desacoplamiento tal como la secuencia CPMG.

La arquitectura 100 también es capaz de implementar dos compuertas cuánticas cúbits, tal como la compuerta CNOT entre cúbits físicos. Se forman dos compuertas cúbit cuando los electrones se cargan en los donantes vecinos 104 lo que permite que la interacción efectiva entre cúbits aumente en seis órdenes de magnitud o más. La interacción electrónica espín-espín puede basarse en interacciones de dipolares directas o de intercambio espín- espín, en dependencia de las dimensiones generales y la ubicación de las estructuras de la compuerta. En el ejemplo descrito, se consideran compuertas mediadas por dipolos. Esta es la forma dominante de interacción cuando los átomos donadores 104 tienen una separación de  $d = 35$  nm. En separaciones más pequeñas, dominaría la interacción de intercambio. Siempre que la fuerza de la interacción caiga por debajo de 10 MHz, se aplica la misma secuencia de pulsos para formar una compuerta basada en CNOT de interacción de intercambio.

La interacción dipolo-dipolo es altamente uniforme en comparación con la interacción de intercambio que se ha predicho que oscila debido a la interferencia entre los seis estados de valle degenerados presentes en el silicio (que puede hacerse más uniforme mediante el uso de silicio tenso). Esto significa que la fuerza de la interacción dipolar es relativamente robusta con respecto a la colocación de donantes. La interacción dipolo-dipolo también es menos probable que fluctúe en respuesta al ruido electrónico en el dispositivo. La interacción dipolo-dipolo entre dos espines electrónicos de donantes vecinos, etiquetados como  $i$ , y  $j$ , está dada por:

$$H_{int} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\hbar}{2\pi} \gamma_e^2 \left( \frac{\sigma_i \cdot \sigma_j - 3(\hat{r} \cdot \sigma_i)(\hat{r} \cdot \sigma_j)}{R^3} \right)$$

Aquí  $R$  es la distancia entre los donantes,  $\hat{r}$  es el vector unitario que describe la orientación de  $r_i - r_j$ .  $\gamma_e$  describe el momento magnético de los dos espines de electrones. El Hamiltoniano total se compone de cada uno de estos términos,

$$H = H_{int} + \sum_i H_{cargado}^{(i)} + H_{AC}^{(i)}$$

Con referencia ahora a la Figura 9, se muestra un diagrama de flujo 900 que comprende una serie de etapas que pueden realizarse para llevar a cabo una compuerta CNOT entre un conjunto seleccionado de cúbits de control y objetivo de la siguiente manera:

cargar un primer electrón con una orientación de espín predefinida en un primer átomo donador (el cúbit 'objetivo' de la operación CNOT, etapa 905);

realizar una operación de rotación X de 180 grados en el espín del primer electrón (etapa 910);

aplicar una compuerta Hadamard al espín nuclear del segundo átomo donador (etapa 915);

cargar un segundo electrón en un segundo átomo donador, el segundo electrón que tiene la misma orientación del espín del primer electrón antes de la rotación X (el cúbit de "control" de la operación CNOT, etapa 920);

aplicar un pulso de desacoplamiento durante la duración de la carga del segundo electrón (etapa 922);

intercambiar los estados de espines nucleares del primer y segundo átomos donadores con los estados de espines de electrones respectivos (etapa 925);

permitir la interacción de los estados de espines de electrones (etapa 927) y aplicar al menos dos pulsos pi de espín-eco en los espines electrónicos mediante el uso de un campo electromagnético global durante la interacción electrón-electrón;

intercambiar los estados de espines de electrones de los primer y segundo átomos donadores con los estados de espines nucleares respectivos (etapa 930);

aplicar una compuerta Hadamard a los espines nucleares del primer átomo donador (etapa 940); y

descargar los primer y segundo electrones (etapa 945).

Con referencia ahora a la Figura 10, se muestra un diagrama de compuerta cuántica 150 que muestra las etapas del diagrama 900 realizadas en los espines de electrones y nucleares de dos átomos donadores diferentes. El diagrama 150 también muestra que durante la etapa 927 puede aplicarse un eco de espines de electrones global o una secuencia de reenfoque 155 y 160 a los estados de espines de electrones para minimizar el error. En la etapa 927, generalmente se



permite una interacción suficiente entre los estados de espines de manera que los estados de espines de electrones adquieran un cambio de fase colectiva de  $n$ , o múltiplo impar de los mismos.

5 El estado de espines de los primer y segundo electrones puede medirse mientras los electrones se descargan. Durante el procedimiento de medición, puede verificarse la orientación de los espines del primer y segundo electrones para detectar posibles errores de la compuerta CNOT.

10 Las etapas 925 y 930 se realizan al aplicar un campo electromagnético a la arquitectura. También se aplican señales de control adicionales en algunos casos para corregir las variaciones en la fuerza de interacción del par de donantes, la fabricación o las imperfecciones del material. Durante la etapa 920, puede aplicarse un pulso ESR de desacoplamiento 922 para evitar que los dos espines de electrones adyacentes se volteen entre sí.

15 La carga escalonada del cúbit de control seguido de los cúbits objetivo se lleva a cabo en etapas secuenciales en celdas cúbit vecinas anidadas. Críticamente, la carga de los electrones de control y su compuerta X ESR posterior hace posible distinguir los electrones de control y objetivo, dándoles diferentes frecuencias de resonancia. Tener frecuencias de resonancia significativamente diferentes hace posible aplicar la aproximación secular a la interacción (que, por lo tanto, puede aproximarse como una interacción de Ising). Esto simplifica las operaciones requeridas y también permite que las compuertas dipolo-dipolo y de intercambio funcionen de manera idéntica.

20 El CNOT también permite la inclusión de un protocolo de corrección de interacción para compensar pequeñas variaciones (desconocidas a priori) en la interacción espín-espín natural debido a la precisión de colocación en el nivel del sitio de la red. En particular, los esquemas basados en BB1 proporcionan un pulso compuesto aplicable, que implementa una compuerta CNOT de alta fidelidad incluso en presencia de variaciones en la fuerza de interacción. Después de cargar ambos electrones, los estados cúbit que se almacenan en los espines nucleares se intercambian con los espines de electrones. Los espines de electrones interactúan para formar la compuerta 930. Intercalar compuertas X ESR relativamente rápidas durante el tiempo en que interactúa el electrón, reenfoca cualquier fase de electrón acumulada a través de efectos no homogéneos residuales, mientras se desplaza con el operador de interacción. Esto garantiza que la fidelidad general de la compuerta CNOT se rige por  $T_2(e)$  en lugar de la  $T^*_2(e)$  mucho más corta. Una vez que se completa la interacción electrón-electrón, los estados de cúbit de datos se intercambian de vuelta de los espines de electrones a los espines nucleares. Los electrones luego se descargan.

35 La lectura se realiza en un espín donante a la vez. En esta etapa, el estado de los espines de electrones también podría leerse a través del SET para proporcionar información sobre la veracidad de la compuerta para ayudar al procedimiento de corrección de errores. Si un electrón no se cargó correctamente o se produjo un error durante la operación, entonces no se medirá un electrón de espín hacia arriba. En este caso, se ha medido que se ha producido un error durante la operación de la compuerta y pueden calcularse los posibles errores que conducen a la no detección de un auxiliar de espín hacia arriba. El caso más probable es que un electrón no se cargó, en cuyo caso la compuerta se diseña para realizar la identidad. Si se detecta dicho error, la operación puede repetirse para realizar una compuerta CNOT correcta, o la información puede pasarse al código de superficie, donde puede corregirse el error. Este tipo de error anunciado es menos perjudicial para la coherencia de una corrección de error cuántico que un error normal no anunciado.

40 Con referencia ahora a la Figura 11(a), se muestra un corte 180 de la arquitectura, que muestra los donantes cargados 184 y las líneas de control correspondientes 206 a la 209 y las islas de control 110. La Figura 11(b) muestra las líneas de control 206 a la 209 que se polarizan (por separado) para permitir la tunelización a las dos ubicaciones de donantes vecinas 184.

50 Uno de los requisitos clave del código de superficie para un UQC, crítico para capturar un umbral alto, es la capacidad de realizar tantas operaciones en paralelo mediante el uso de la arquitectura de cúbit 2D. La arquitectura presentada en este documento es ideal para esta tarea. La combinación de campos globales RF/ESR para el control de compuertas junto con la matriz de compuertas cruzadas permite un alto grado de control, y en particular, operación paralela. Para implementar las operaciones requeridas para la extracción del síndrome y la codificación lógica de cúbit, las operaciones lógicas de cúbit y la corrección de errores en el código de superficie (o códigos topológicos relacionados), es necesario cargar y descargar electrones en una variedad de patrones geométricos. El diseño geométrico limita qué donantes pueden cargarse y descargarse en cada etapa, aunque no todos los patrones pueden crearse en una sola etapa. En base a las simulaciones de capacitancia mostradas en el anterior, se espera que todos los patrones geométricos necesarios para la implementación de la corrección de error cuántico topológico puedan crearse en paralelo mediante el uso de solo un pequeño número de etapas. Si bien pueden crearse patrones geométricos simples, tales como líneas y rectángulos, en una o dos etapas. Pueden crearse patrones más complejos al combinar estos patrones geométricos simples secuencialmente para cargar electrones y construir regiones y patrones más complejos. El ejemplo más simple de un patrón de carga es cargar un solo electrón en una ubicación específica.

60 Con referencia ahora a la Figura 12(a), se muestra una configuración de carga de un electrón en una única ubicación donante 254 a través del SET respectivo. Los voltajes se aplican a líneas de control verticales y horizontales. Se controlan dos líneas de control vecinas (oscuras) para compensar y evitar la tunelización no deseada de electrones en otras ubicaciones de donantes.

65

Con referencia ahora a las Figuras 12 (b) a (e), se muestra una secuencia típica de configuraciones de carga usadas para implementar una medición del síndrome de código de superficie.

5 Las figuras muestran los cúbits auxiliares 254 y los cúbits de datos 256. Los auxiliares 254 se cargan en los cúbits de síndrome y las ubicaciones correspondientes requeridas para esa medición de síndrome, a saber, norte (b), este (c), oeste (d) y sur (e) de un cúbit de síndrome dado. En cada subfigura, las líneas de control de color o gris muestran la aplicación de una polarización de voltaje aplicada para cargar y descargar electrones de los donantes correspondientes 254 y 256.

10 Las direcciones cardinales se usan para indicar las posiciones relativas de los átomos donadores o cúbits dispuestos a través de la matriz.

15 Las líneas horizontales verticales que se muestran representan las líneas de control. Las líneas verticales y horizontales coloreadas representan el conjunto de líneas de control a polarizar. Los donantes se muestran como puntos, ubicados entre filas y columnas. La ubicación de las islas SET se muestra como rectángulos rellenos en la intersección apropiada de las líneas de control de fuente y drenaje.

Con referencia ahora a la Figura 13, se muestra un diagrama de flujo 350 que comprende una serie de etapas que pueden realizarse para llevar a cabo una extracción de síndrome como se ilustra en la Figura 12. Las etapas son las siguientes:

20 cargar un electrón en un átomo donador auxiliar y realizar una rotación cuántica en el cúbit auxiliar en dependencia del tipo de medición del estabilizador (X o Z) que se llevará a cabo para la corrección de errores (352);

cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al norte del átomo donador auxiliar (etapa 355);

25 realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el norte (etapa 356);

descargar el electrón hacia el norte (etapa 357);

30 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al oeste del átomo donador auxiliar (etapa 360);

realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el oeste (etapa 361);

descargar el electrón hacia el oeste (etapa 362);

35 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al este del átomo donador auxiliar (etapa 365);

realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el este (etapa 366);

descargar el electrón hacia el este (etapa 367);

40 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al sur del átomo donador auxiliar (etapa 370);

realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el sur (etapa 371); y

45 descargar el electrón hacia el sur y realizar una segunda rotación cuántica en el cúbit auxiliar en dependencia del tipo de medición del estabilizador (X o Z) que se llevará a cabo para la corrección de errores y realizar la lectura del cúbit auxiliar (etapa 372).

50 Como se ilustra en la Figura 12, las etapas de cargar electrones en los átomos donadores auxiliares pueden realizarse simultáneamente en una pluralidad de átomos donadores a través de la arquitectura al aplicar voltajes de control apropiados a las líneas de control.

55 Al aplicar el voltaje correcto establecido a estas líneas, puede inducirse un electrón para que haga un túnel desde la isla al donante respectivo, como se discutió con referencia a las Figuras 1 y 2. En solo un caso, en la intersección de las líneas de control a las que se han aplicado voltajes de polarización, los electrones pueden hacer un túnel sobre (o desde) el donante. Otras combinaciones de voltajes aplicados en diferentes átomos donadores no permiten la tunelización. En la Figura 12 (a), por ejemplo, la tunelización solo tiene lugar en una sola ubicación y solamente se carga un solo electrón en la matriz. Sin embargo, este método no se limita a cargar y descargar solo electrones individuales. Puede obtenerse cualquier forma geométrica al aplicar los voltajes correctos. En la Figura 12 (b) a (e) varias combinaciones de electrones se ponen en resonancia con la isla. Muchos patrones geométricos simples pueden crearse de esta manera. Por ejemplo, pueden crearse rectángulos y muchos patrones repetitivos al aplicar diferentes combinaciones de conjuntos de polarizar celdas. No todos los patrones pueden crearse de esta manera en una sola etapa. Sin embargo, al usar los patrones regulares como primitivos, pueden crearse patrones mucho más complejos mediante el uso de una secuencia de etapas de carga. Pueden requerirse patrones particulares de compuertas para la implementación de mediciones de síndromes para el código de superficie. Estas compuertas y secuencias son altamente repetitivas, y las interacciones necesarias para

la medición de síndromes pueden reproducirse y realizarse sistemáticamente en paralelo. Esta serie de mediciones de síndromes requiere la aplicación de compuertas CNOT al norte, oeste, este y sur auxiliar del cúbit de datos.

5 Esto forma naturalmente la base para la extracción del síndrome requerida en los diversos protocolos de corrección de errores cuánticos. Si se requiere un defecto, las mediciones correspondientes pueden descuidarse al descargar los electrones correspondientes. Para extraer todos los síndromes, la serie de mediciones de síndromes se repite, se transpone a la derecha en dos posiciones, arriba en dos posiciones y arriba a la derecha en dos posiciones. Es posible que la secuencia no se realice en cúbits demasiado cerca del espacio, porque de lo contrario los electrones que no están destinados a acoplarse se acoplarán a través de la interacción dipolo-dipolo, lo que degrada la fidelidad de la compuerta. 10 Esta secuencia tarda cuatro veces más que la medición canónica del síndrome simultánea de una sola etapa. En total, entonces, si el número de operaciones paralelas individuales requeridas para la extracción completa del síndrome es  $N_{\text{etapas}}$ . El umbral de error del código de superficie correspondiente se estima que es  $P_{\text{th}} \approx 1\%$ .

15 Con referencia ahora a la Figura 14, se muestran resultados de simulaciones de control de compuerta electrostática para direccionamiento cúbit. La Figura 14(a) muestra un par de cables de fuente (S) y de drenaje (D) que cruzan un SET polarizados negativamente para sumergir los potenciales de carga de sus cuatro donantes más cercanos. La simetría en los cuatro potenciales donantes se rompe por una combinación de desintonización (GA, GB, GA', GB') que permite seleccionar un solo donante para la carga de electrones.

20 Cargar un electrón a un cúbit específico requiere la aplicación de un voltaje de polarización positiva a un par de líneas de control de cruce de manera que la energía electrostática agregada debido a una sola compuerta es insuficiente para acceder al estado  $D^0$ , pero la combinación es suficiente. Esto garantiza que no se carguen erróneamente otros cúbits a lo largo de una fila/columna. El diseño multiplexado significa que para cada par de compuertas de intersección GA y GB todavía hay 4 átomos donadores que se ven como equivalentes por esta combinación de compuerta. En la Figura 14(a), la intersección de GA y GB se rodea por 4 donantes equidistantes. Cargar un electrón en solo uno de estos sin afectar a los otros requiere voltajes de compensación en otras compuertas cercanas. Por ejemplo, el par S y D pueden polarizarse simultáneamente con una fracción del voltaje de la compuerta primaria para reducir el potencial de carga para el donante amarillo objetivo por debajo de los otros tres. Al mismo tiempo, la aplicación de un voltaje negativo a los pares GA y GB y S y D más próximos aumenta el potencial de transición para los donantes no objetivo circundantes. Si bien el uso de las líneas de fuente y drenaje como compuertas secundarias dará como resultado grandes voltajes de polarización en los SET no objetivo, el flujo de corriente resultante se identifica fácilmente y puede ignorarse. Para los mapas de ritmo de las compuertas que se muestran, los factores de compensación son 1, 0,6 y (0,6) para las compuertas objetivo, vecina más cercana y las próximas líneas vecinas más cercanas, respectivamente.

35 La Figura 14(b) es un modelo de estructura alámbrica 3D usado para el cálculo de capacitancia Fastcap. La extensión espacial de todas las entidades se dilata en 2 nm en todas las direcciones de acuerdo con el radio de Bohr en silicio.

40 La Figura 14(c) es un análisis de estabilidad de carga. El cada vez más negativo  $V_{\text{caída}} = V_S = V_D$  carga electrones adicionales al SET (líneas I y II). En  $V_{\text{caída}} = -15$  mV,  $V_{\text{inclinación}} = 0$  se carga un electrón en cualquiera de los cuatro donantes (III). Un voltaje  $V_{\text{inclinación}}$  a lo largo del eje x separa las condiciones de carga para los donantes. En este caso ( $V_{\text{inclinación}} = 2V_{GA} = -2V_{GA0} = V_{GB} = -V_{GB0}$ ) el donante superior derecho se carga preferentemente. La carga y lectura selectiva del espín se producen en la intersección de las líneas del donante y SET en IV, V, etc. La Figura 14(d) muestra las coordenadas de la compuerta donde solo el donante superior derecho está ocupado y todos los demás que lo rodean están ionizados. La región azul hash indica las coordenadas donde además se carga su donante vecino del sur como para una compuerta de dos cúbits. Las áreas en gris indican que se cargan otros donantes objetivos. La Figura 14(e) muestra un caso SET no compartido (Tipo II). Una compuerta de dos cúbit en el par superior de donantes requiere agregar un voltaje de caída al drenaje vecino  $V_{\text{caída}} = V_S = V_D = 2,2 V_D$ . Esto permite la carga secuencial y selectiva de solo esos dos donantes.

50 Dado que solo se requieren las compuertas más cercanas y próximas a las más cercanas para una selección de cúbit inequívoca, y las compuertas más distantes tienen un acoplamiento electrostático insignificante, la operación paralela a gran escala en esta arquitectura es una cuestión de repetir el patrón de polarización de compuerta en cada cuarta compuerta/línea principal horizontal y verticalmente. Esto operará en 1 de cada 8 cúbit donantes simultáneamente, ya que cada otro donante es un auxiliar en el código de superficie. En operación paralela, las señales de confirmación de compuerta y lectura de múltiples SET se superpondrán juntas, muchas señales de cúbit por línea de fuente/drenaje. 55 Siempre que el ancho de banda del sensor SET sea mayor que la velocidad de activación/desactivación de tunelización, será posible correlacionar temporalmente los cambios discretos en la corriente a través de una fuente y un drenaje para identificar inequívocamente la ubicación del cúbit particular desde donde se originó la señal. Si dos electrones hacen un túnel en momentos similares, es posible que no puedan resolverse temporalmente, lo que significa que la ubicación del electrón no puede resolverse. Esto puede remediarse al ignorar la medición (y permitir la corrección de errores para corregir cualquier error resultante) o repetir la medición. Al repetir la medición, se vuelve exponencialmente improbable que las mismas dos ubicaciones den una colisión temporal. Por lo tanto, se necesitarían pocas mediciones incluso para cuadrículas de cúbits extremadamente grandes. Nuestro diseño de ordenador cuántico se basa en la capacidad de cargar y eliminar un solo electrón de un cúbit donante objetivo dado. La capacidad de cargar, descargar, leer un electrón individual de un donante se ha demostrado en varios experimentos.

En la arquitectura de procesador cuántico descrita en la presente descripción, una forma primaria de decoherencia se debe al desfase relacionado con el fósforo en silicio. Cada cúbit interactúa con un entorno, compuesto principalmente por un pequeño número de espines nucleares residuales de  $^{29}\text{Si}$ . En la práctica, no puede lograrse un entorno isotópicamente puro perfecto, y las fluctuaciones en el baño de espines nucleares conducen al desfase de los electrones y núcleos donantes de fósforo. Cada compuerta puede simularse en presencia del desfase de espines nucleares y de electrones. Aunque está presente el desfase de los espines de electrones y nucleares, la fuente dominante de error surge del desfase inducido debido a la carga y descarga del espín de electrones del donante. Los pulsos  $n$  de un solo cúbit se simulan en presencia del desfase nuclear y de electrones. En el caso ideal, sin considerar el error de carga, estas compuertas también demoran aproximadamente  $t \approx 21 \mu\text{s}$ , y tienen un error de decoherencia y errores de pulso tan pequeños como  $5 \times 10^{-5}$ . Las rotaciones de ángulo arbitrarias alrededor de dos ejes independientes permiten la capacidad de realizar cualquier rotación de un solo cúbit, con un nivel de error similar. Sin embargo, cuando se considera la carga (que incluye tanto el desfase debido a la carga de un electrón como la probabilidad de no cargar un electrón), una compuerta de un solo cúbit tiene un error de aproximadamente  $2 \times 10^{-4}$ , y un tiempo de aproximadamente 1,1 ms, ambos dominados por el proceso de carga y descarga de electrones.

Con referencia ahora a la Figura 15, se muestran resultados de simulación de la activación de cúbit de fase coincidente (PM) y la compuerta CNOT. La Figura 15(a) muestra el error total de carga de PM con respecto al umbral del código de superficie, que incluye el desfase de cúbit residual, como una función de la ventana de pulso de PM,  $\Delta t$ , y la longitud total del tren de pulsos  $T_{\text{PM}}$  para un intervalo de tasas de tunelización de donantes SET  $\tau = 100, 500, 1000 \text{ ns}$ . La Figura 15(b) muestra el error de compuerta CNOT y el tiempo de operación total (que incluye las operaciones de carga y descarga de PM) para anchos de ventana de pulsos de PM  $\Delta t = 0,2, 0,4, 0,6$  y  $0,8 \text{ ns}$  (parámetros fijos:  $\tau = 500 \text{ ns}$ , separación de cúbit de  $30 \text{ nm}$  y  $T_2(e) = 2\text{s}$ ).

En presencia del desfase representado por  $T_2^e$  y  $T_2^n$ , esta compuerta tiene una fidelidad total de aproximadamente el 99,97 %. Esta fidelidad se domina por el desfase impuesto por la tunelización del electrón en y fuera del núcleo, y durante el tiempo requerido para la interacción entre electrones.

Para un ancho de pulso de carga de  $\Delta t_{\text{carga}}$  y tiempo  $\Delta t_{\text{bloqueo}} = 1/A$  entre pulsos, y al suponer probabilidades de tunelización exponencial de encendido/apagado caracterizadas por tiempos de tunelización promedio  $\tau_{\text{encendido, apagado}}$ , la probabilidad de carga en el donante, después de  $N$  pulsos de carga es:

$$P_{T, \text{encendido}}(N) = 1 - e^{-\Delta t_{\text{bloqueo}}/\tau_{\text{apagado}}} \left( 1 - e^{-\Delta t_{\text{carga}}/\tau_{\text{encendido}}} \right) \times \frac{\left( 1 - e^{-\Delta t_{\text{carga}}/\tau_{\text{encendido}}} e^{-\Delta t_{\text{bloqueo}}/\tau_{\text{apagado}}} \right)^N}{\left( 1 - e^{-\Delta t_{\text{carga}}/\tau_{\text{encendido}}} e^{-\Delta t_{\text{bloqueo}}/\tau_{\text{apagado}}} \right)}$$

Al exigir un error de fase general de  $10^{-4}$  o menos, se requiere un  $\Delta t_{\text{carga}}$  de 0,27. Con tiempos de tunelización de  $\tau_{\text{encendido}} = 1 \mu\text{s}$  y  $\tau_{\text{apagado}} \gg \tau_{\text{encendido}}$  y un error de carga de  $10^{-4}$  o la longitud total de la secuencia SDL es 0,53 ms, acorde con la compuerta CNOT basada en dipolo. Tanto para las compuertas de un solo cúbit como para las de dos cúbits, cuando un electrón no se carga, la compuerta aplicada no realiza ninguna operación en los cúbits de espines nucleares. La carga correcta de espines de electrones puede variar después de cada operación, al medir el estado del espín de electrones. Volteado con el espín hacia arriba, la presencia de un electrón es detectable a través de la lectura de espín realizada en el SET. En principio, esto significa que el funcionamiento correcto de las compuertas puede verificarse a través de este mecanismo de lectura y repetirse si la compuerta no se ha implementado correctamente. Si hay  $r$  rondas de repetición, y la probabilidad original de no cargar correctamente un electrón es  $p$ , entonces la probabilidad de que no se cargue correctamente después de  $r$  rondas se reduce a  $p^r$ , que el error de umbral de un código de corrección de error se reducirá a aproximadamente  $p_{\text{th}}/r$ . Si no se usa de esta manera repetitiva, esta información adicional sobre los errores introducidos por las compuertas puede complementar la medición del síndrome. No medir un electrón donde se espera anuncia un error en una compuerta, un error que es mucho más fácil de corregir que un error estocástico. A diferencia de las compuertas de un solo cúbit, el desfase  $T_2^e$  tiene un impacto significativo en la compuerta CNOT de mayor duración. La compuerta CNOT se ha simulado al suponer una separación de  $35 \text{ nm}$  donde la interacción dipolo-dipolo domina sobre la interacción de intercambio. En la Figura 15 se muestra la fidelidad general de la compuerta CNOT, para una variedad de tasas de desfase electrónico. Mientras que a una separación de  $35 \text{ nm}$  pueden construirse compuertas para hacer uso de la interacción dipolo-dipolo, a una separación más cercana la interacción de intercambio entre los donantes será significativa. En principio, las compuertas aún pueden construirse con precisión siempre que la relación entre la fuerza hiperfina (A) y la fuerza de interacción de intercambio (J) permanezca alta. Las dos interacciones tienen la misma fuerza a aproximadamente  $15 \text{ nm}$  de separación. Hacer uso de la interacción de intercambio (al construir separaciones más pequeñas) permitiría compuertas de dos cúbit a escalas de tiempo de operación de hasta  $10 \text{ MHz}$ .

Con referencia ahora a la Figura 16, se muestra un ejemplo alternativo de una arquitectura de procesador cuántico. La arquitectura 190 es operable mediante el uso de principios similares a la arquitectura de la Figura 1. Sin embargo, en la arquitectura 190, el acoplamiento entre donantes se ve mejorado por los cúbits de acoplamiento intermedios 192. Estos acoplan cada cúbit de datos 194 a dos cúbits auxiliares de síndrome X 196 y dos cúbits auxiliares de síndrome Z 198. Los cúbits de acoplamiento adicionales proporcionan capacidades de acoplamiento mejoradas con respecto a la arquitectura de la Figura 1, y un método diferente de operación que no requiere carga de fase coincidente.

5 Las operaciones descritas anteriormente forman una base de operaciones primitivas para realizar el código de superficie en la arquitectura descrita. Las combinaciones de estas operaciones primitivas, realizadas en la misma arquitectura, permiten realizar tareas de corrección de errores cuánticos de alto nivel. Por ejemplo, el uso de las operaciones primitivas que se discuten en secuencias de 'líneas de operaciones' pueden realizarse en la arquitectura que aborda líneas de cúbits en toda la arquitectura. Por lo tanto, puede definirse un cúbit 'lógico' más grande. El cúbit lógico se define en un gran conjunto de cúbits físicos y sus auxiliares.

10 Las compuertas cuánticas en estos cúbits lógicos también pueden realizarse al aplicar operaciones primitivas a los cúbits que forman el cúbit lógico. Aunque la secuencia de las operaciones primitivas específicas puede ser compleja, los procedimientos globales realizados en los cúbits lógicos son los descritos en la presente descripción con referencia a los cúbits implementados en átomos donadores de fósforo individuales. Por ejemplo, una compuerta CNOT entre dos cúbits lógicos puede dar como resultado una serie muy compleja de operaciones realizadas en muchos cúbits de la arquitectura. La invención descrita en la presente no se limita a la arquitectura y la implementación de las operaciones primitivas, sino que abarca el cálculo cuántico corregido por error de alto nivel realizado en los cúbits lógicos introducidos anteriormente.

20 La arquitectura descrita en las modalidades anteriores proporciona una nueva vía para el cálculo cuántico escalable mediante el uso de cúbits donantes de silicio. Sin embargo, la invención no se limita a esto, el modelo de control simplificado puede ser útil para otros sistemas de estado sólido donde el número y la complejidad de acomodar las líneas de control es un cuello de botella significativo para la mejora.

Las técnicas tales como el procedimiento de carga coincidente pueden aplicarse a diferentes tipos de aplicaciones y estructuras cuánticas y no se limitan a la arquitectura descrita en la presente descripción.

REIVINDICACIONES

1. Un procesador cuántico (100, 190) que comprende:
  - una pluralidad de elementos cúbit (192, 194, 196, 198, 254, 256);
  - una pluralidad de miembros de control dispuestos para controlar la pluralidad de elementos cúbit; en donde un estado cuántico de los elementos cúbit se codifica en el espín nuclear o de electrones de uno o más átomos donadores (104, 184, 604) incorporados en una estructura semiconductor (102), **caracterizado porque** los elementos cúbit se disponen en una disposición de matriz bidimensional, y por una estructura de control que comprende:
    - los miembros de control que comprenden un primer conjunto de miembros de control alargados (106, 206, 207), dispuestos en un primer plano encima de un plano que comprende los átomos donadores, y un segundo conjunto de miembros de control alargados (108, 208, 209), dispuestos en un segundo plano debajo del plano que comprende los átomos donadores;
    - una pluralidad de elementos de control (110) dispuestos en un plano entre el primer y el segundo plano, cada elemento de control que forma un solo transistor de electrones (112, 606) con un miembro de control respectivo del primer conjunto y un miembro de control respectivo del segundo conjunto, en donde cada miembro de control se dispone para controlar una pluralidad de elementos cúbit dispuestos a lo largo de una fila o una columna de la matriz bidimensional para realizar el cálculo cuántico corregido por error topológico, en donde
    - cada miembro de control se dispone en las intersecciones o entre dos filas o columnas de átomos donadores en un plano encima o debajo de un plano que comprende los átomos donadores, los miembros de control (106, 206, 207) del primer conjunto son paralelos entre sí y los miembros de control (108, 208, 209) del segundo conjunto son paralelos entre sí; y
    - los miembros de control del primer conjunto se disponen para intersecar los miembros de control del segundo conjunto para formar una pluralidad de intersecciones donde los miembros de control de diferentes conjuntos se superponen en la dirección perpendicular al plano que comprende los átomos donadores (104, 184, 604).
  
2. El procesador de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la estructura de control puede controlarse para interactuar simultáneamente con una pluralidad de elementos cúbit (192, 194, 196, 198, 254, 256) dispuestos en un patrón de cúbits.
  
3. El procesador de acuerdo con la reivindicación 2, en donde una pluralidad de átomos donadores (104, 184, 604) se dispone para facilitar el acoplamiento electromagnético entre uno o más de los elementos cúbit (192, 194, 196, 198, 254, 258).
  
4. El procesador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 3 en donde:
  - una pluralidad de elementos cúbit de datos (194, 256) se codifica en un primer conjunto de los átomos donadores (104, 184, 604);
  - una pluralidad de elementos cúbit auxiliares se codifica en un segundo conjunto de los átomos donadores (104, 184, 604); y
  - en cada fila o columna de la matriz, los cúbits de datos se alternan con cúbits auxiliares para facilitar la corrección de errores cuánticos; y
  - los cúbits de datos lógicos se codifican en una pluralidad de elementos cúbit de datos y los cúbits auxiliares lógicos se codifican en una pluralidad de elementos cúbit auxiliares.
  
5. Un método para cargar o descargar un electrón hacia o desde un átomo donador (104, 184, 604) de un procesador cuántico (100, 190) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 4 que comprende las etapas de:
  - conmutar, durante un número predeterminado de veces, una o más señales electrostáticas aplicadas a los miembros de control respectivos (106, 206, 207, 108, 208, 209) de una primera configuración a una segunda configuración, en donde la primera configuración de señales es tal que impide la tunelización cuántica del electrón hacia o desde el átomo donador y la segunda configuración de señales es tal que permite la tunelización cuántica del electrón hacia o desde el átomo donador.
  
6. El método de acuerdo con la reivindicación 5, en donde el número predeterminado de veces se selecciona de manera que la tunelización cuántica del electrón se produce con un nivel de confianza predeterminado.
  
7. Un método para operar una compuerta cuántica Pauli X en un procesador (100, 190) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 4, el método que comprende las etapas de:
  - aplicar un campo magnético a un átomo donador (104, 184, 604) con un electrón cargado, el campo magnético que está en resonancia con el espín nuclear del átomo donador;
  - permitir la rotación coherente del espín nuclear por un ángulo  $\theta=180$  grados; y eliminar el campo magnético.
  
8. Un método para operar una compuerta cuántica CNOT en un procesador (100, 190) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 4, el método que comprende las etapas de:
  - cargar un primer electrón con una orientación de espín predefinida en un primer átomo donador (104, 184, 604);

- 5 realizar una operación de compuerta Pauli X en el espín del primer electrón;  
 aplicar una compuerta Hadamard al espín nuclear del primer átomo donador;  
 cargar un segundo electrón en un segundo átomo donador (104, 184, 604), el segundo electrón que tiene la  
 misma orientación de espín del primer electrón antes de que la compuerta Pauli X se realice en el primer  
 electrón;  
 intercambiar los estados de espines nucleares del primer y segundo átomos donadores con los estados de  
 espines de electrones respectivos; lo que permite la interacción de los estados de espín de electrones;  
 intercambiar los estados de espines de electrones del primer y segundo átomos donadores con los estados de  
 espines nucleares respectivos; aplicar una compuerta Hadamard a los espines nucleares del primer átomo  
 donador; y  
 10 descargar los primer y segundo electrones.
9. Un método para realizar la lectura de un estado cuántico de una pluralidad de elementos cúbit en un procesador  
 (160, 190) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 4, el método que comprende las etapas de:  
 15 controlar simultáneamente una pluralidad de miembros de control (106, 206, 207, 108, 208, 209) dispuestos  
 para interactuar con los átomos donadores (104, 184, 604) asociados con la pluralidad de elementos cúbit (192,  
 194, 196, 198, 254 256); medir las señales eléctricas propagadas en la pluralidad de miembros de control; y  
 realizar una o más operaciones de correlación de tiempo mediante el uso de una o más de las señales  
 20 eléctricas medidas para determinar la información de lectura asociada a los elementos cúbit que permiten la  
 lectura simultánea.
10. Un método para realizar la corrección cuántica en un procesador cuántico (100, 190) de acuerdo con cualquiera de  
 las reivindicaciones 1 a la 4, en donde una pluralidad de elementos cúbit de datos (256, 194) se codifican en un  
 primer conjunto de átomos donadores (104, 184, 604) y una pluralidad de elementos cúbit auxiliares(196, 198, 254)  
 25 se codifican en un segundo conjunto de átomos donadores (104, 184, 604); y en donde en cada fila o columna de  
 la matriz, los cúbits de datos se alternan con los cúbits auxiliares para facilitar la corrección cuántica; el método de  
 control que comprende las etapas de:  
 cargar un electrón en un átomo donador auxiliar;  
 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al norte del átomo donador auxiliar;  
 30 realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el norte;  
 descargar el electrón hacia el norte;  
 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al oeste del átomo donador auxiliar;  
 realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el oeste;  
 35 descargar el electrón hacia el oeste;  
 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al este del átomo donador auxiliar;  
 realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el este;  
 descargar el electrón hacia el este;  
 cargar un electrón en un átomo donador de datos dispuesto al sur del átomo donador auxiliar;  
 40 realizar una compuerta CNOT entre el átomo donador auxiliar y de datos hacia el sur; y  
 descargar el electrón hacia el sur; y  
 en donde las etapas de cargar electrones en los átomos donadores de datos/auxiliares se realizan  
 simultáneamente en una pluralidad de átomos donadores a través de la matriz bidimensional.

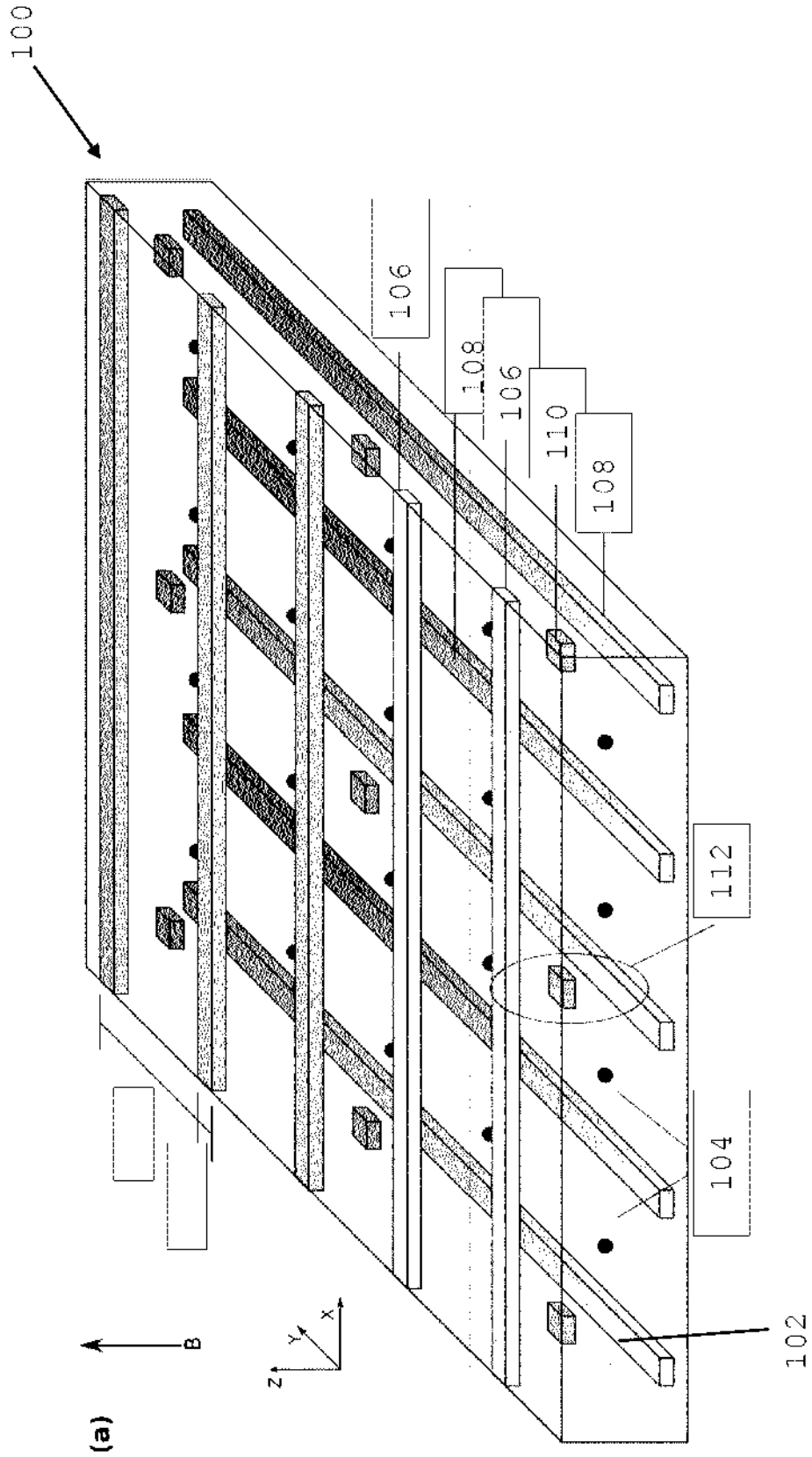


FIGURA 1



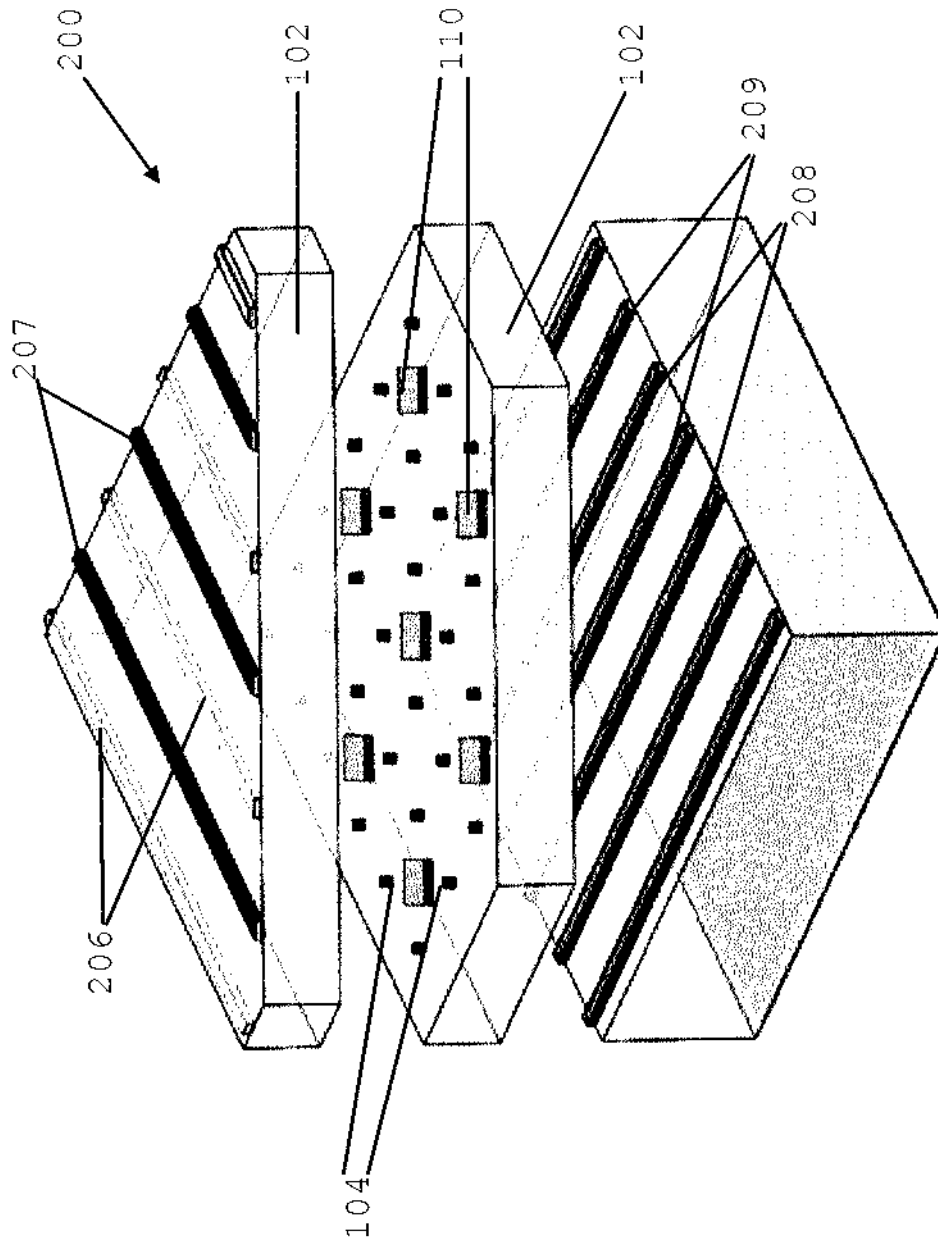


FIGURA 2

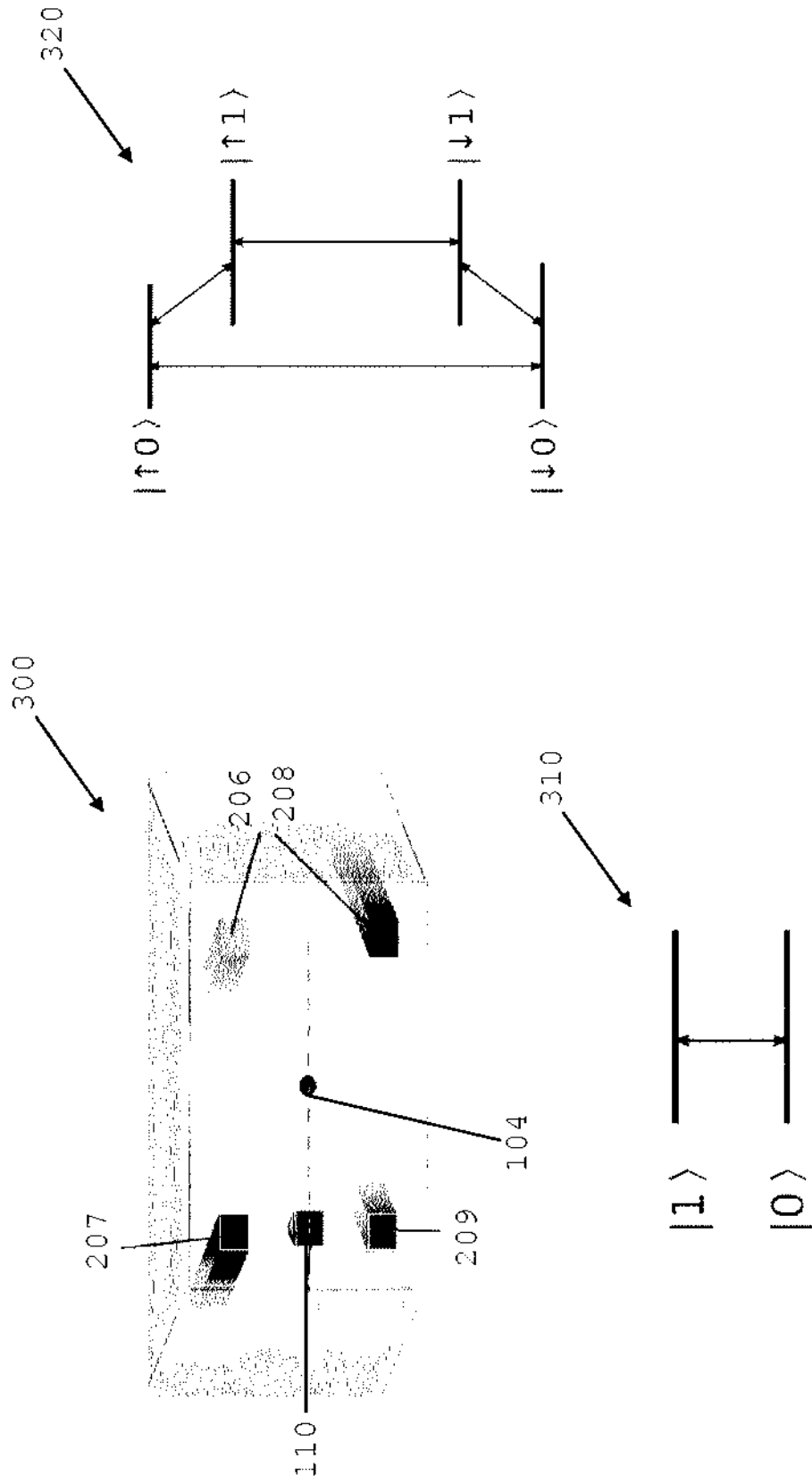


FIGURA 3

400



405 - Aplicar una o más señales electrostáticas a miembros de control respectivos de acuerdo con una primera configuración

410 - Cambiar, por un número predeterminado de veces, la una o más señales electrostáticas de una primera configuración a una segunda configuración

**FIGURA 4**

500

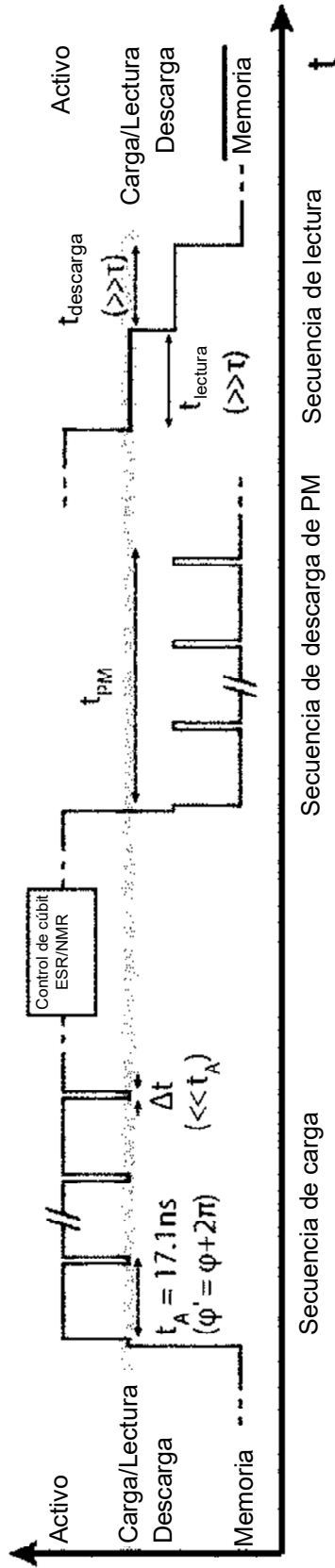


FIGURA 5

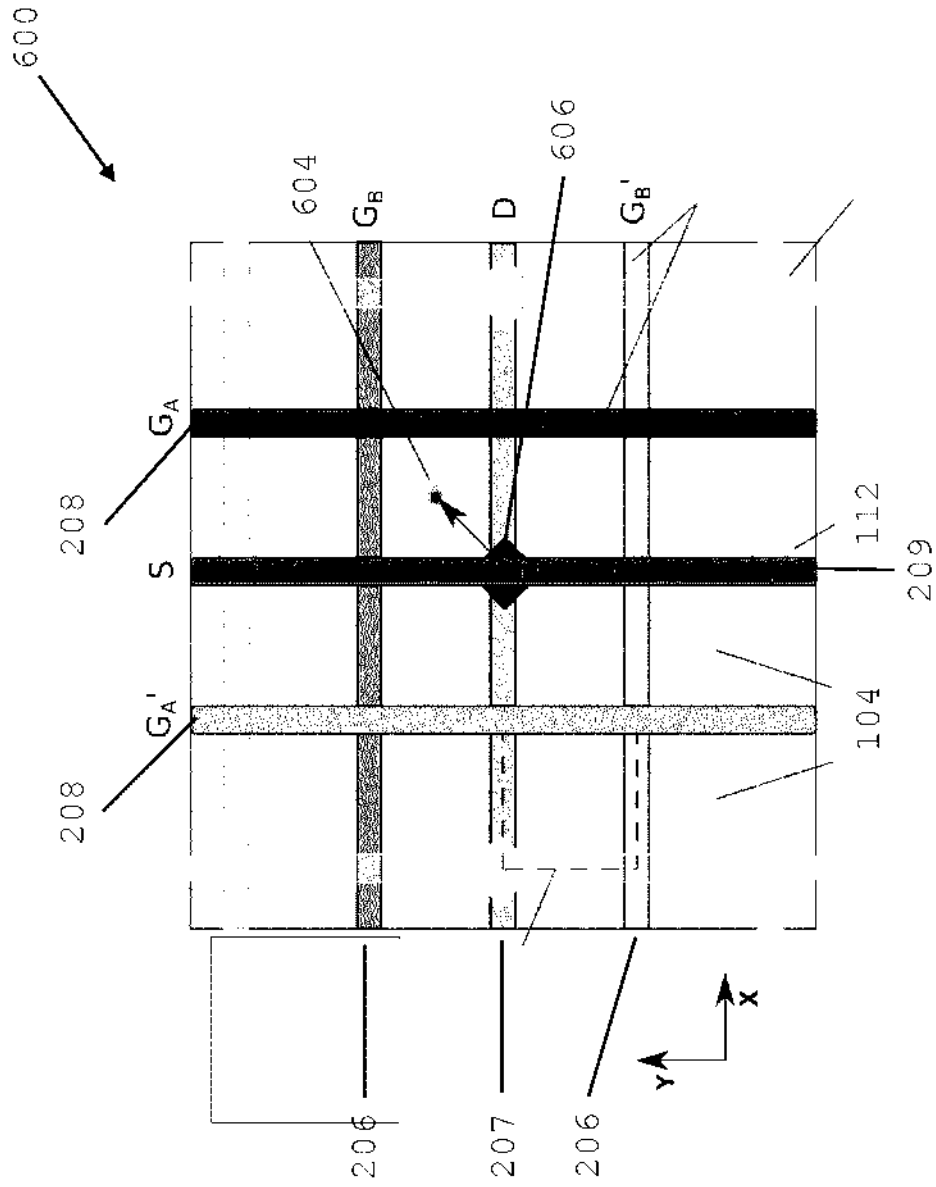


FIGURA 6

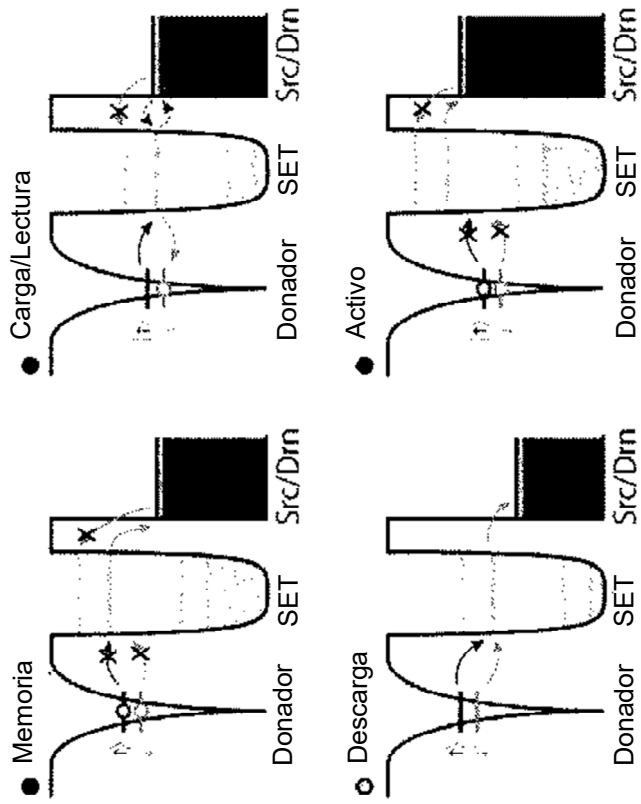


FIGURA 7(b)

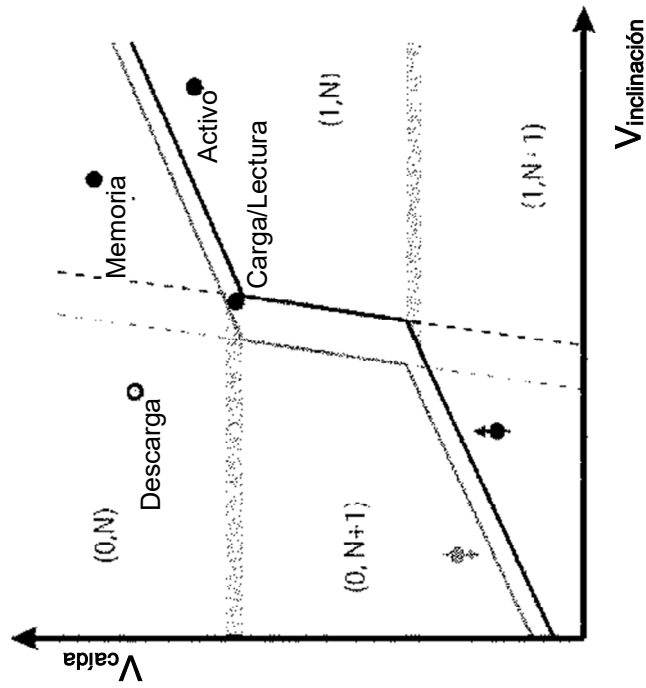
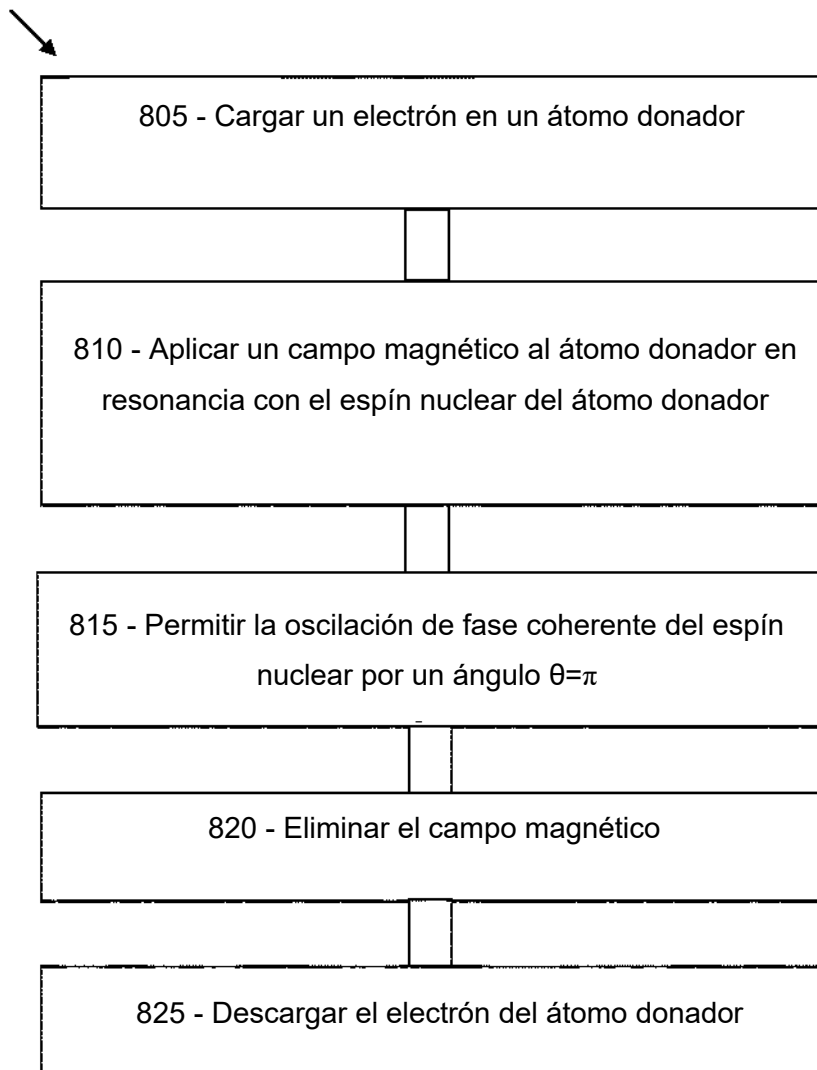


FIGURA 7(a)

800



**FIGURA 8**

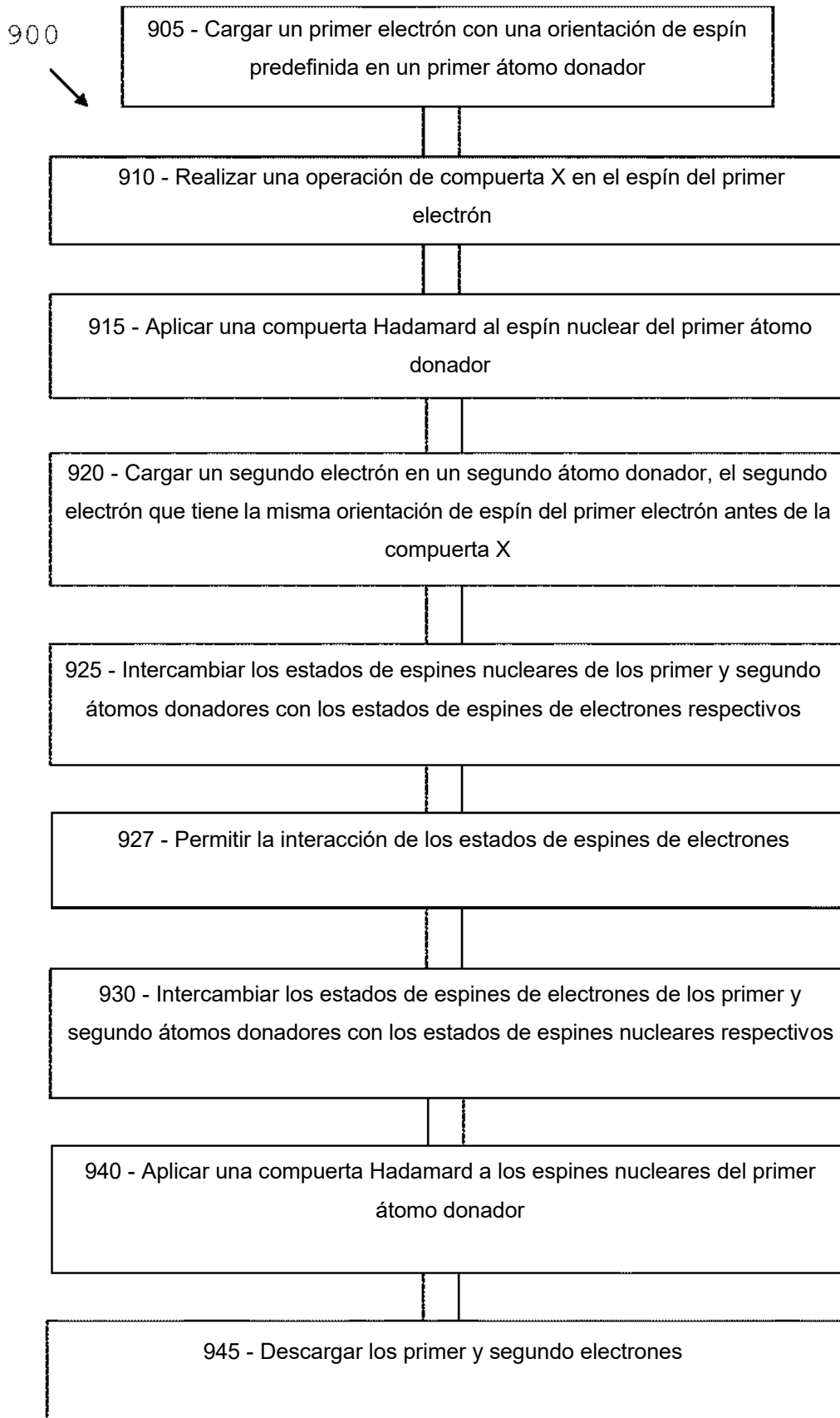


FIGURA 9



150

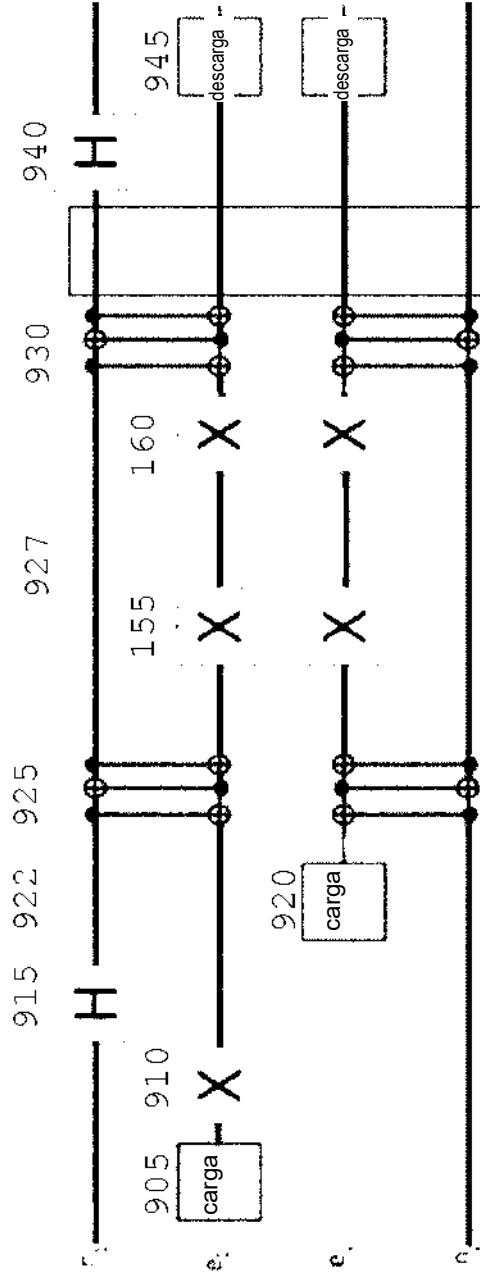


FIGURA 10

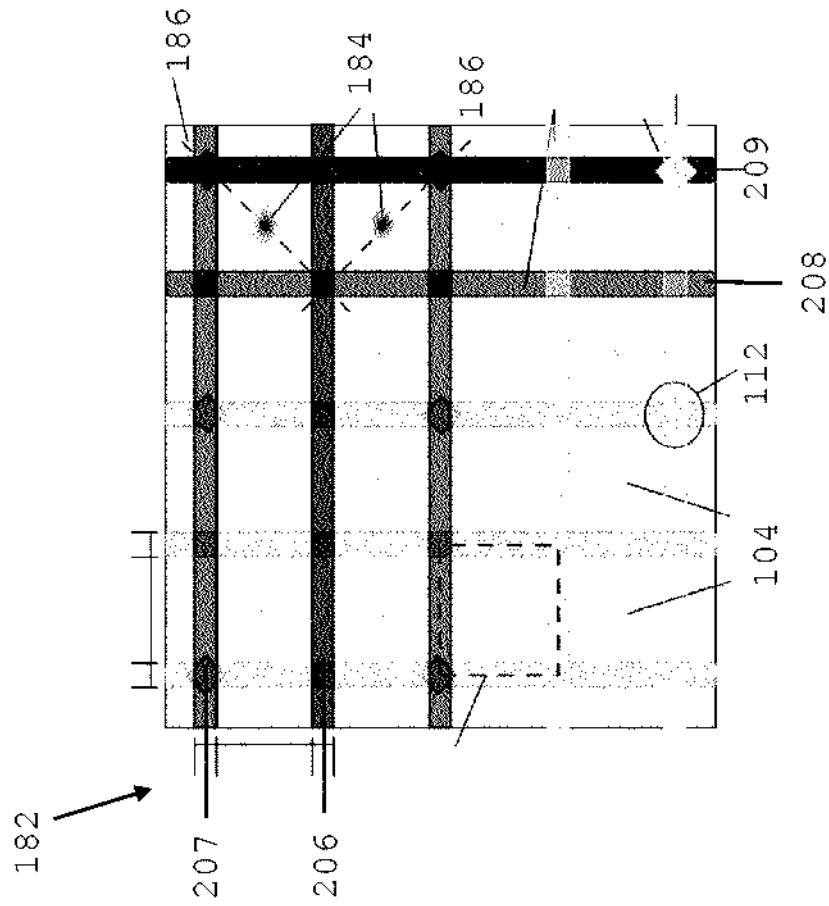


FIGURE 11(b)

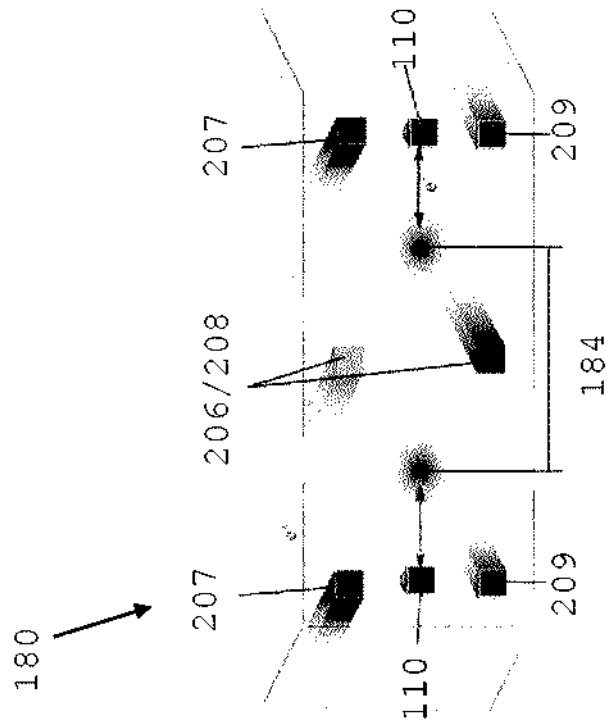


FIGURE 11(a)

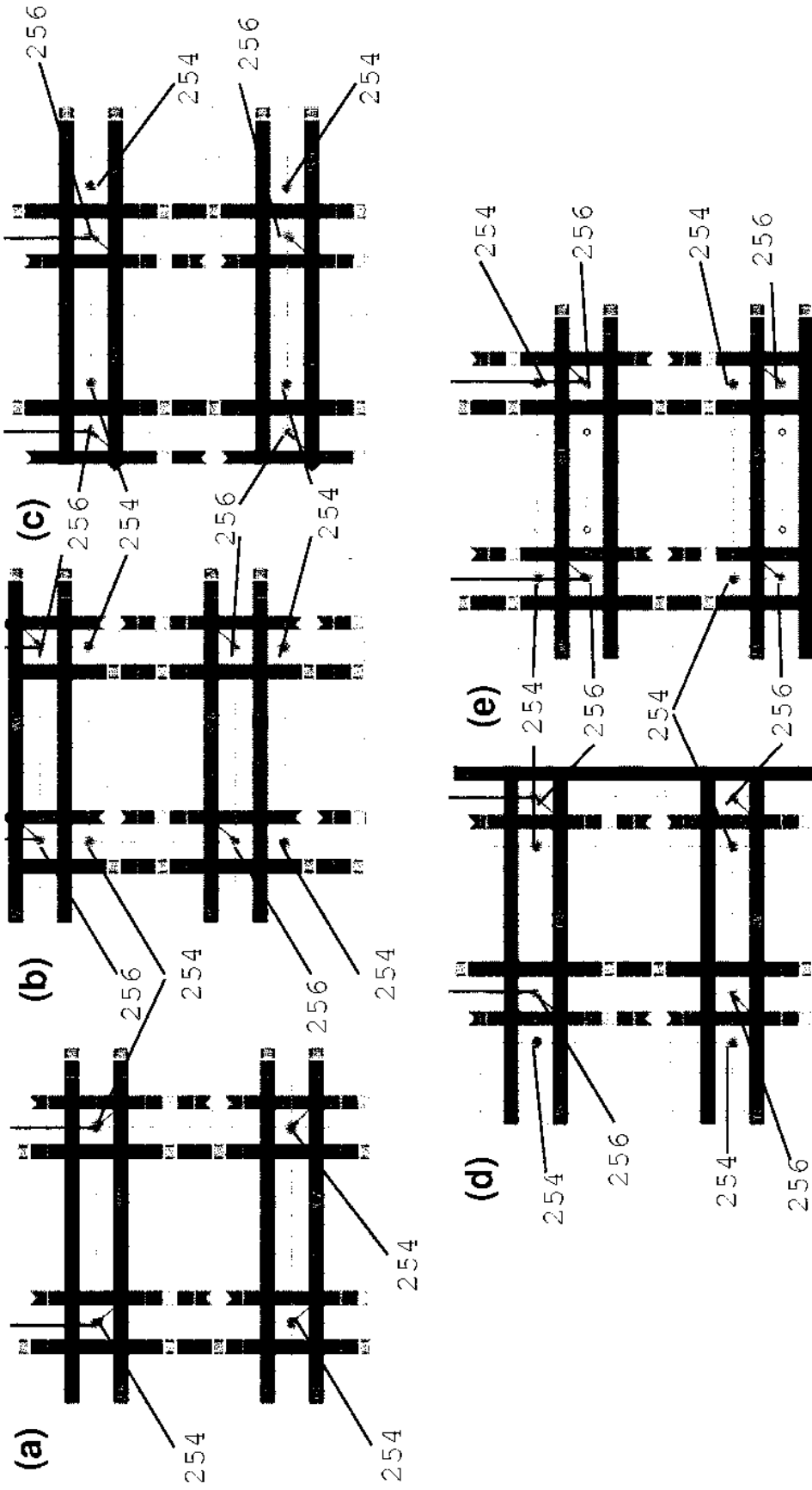


FIGURA 12

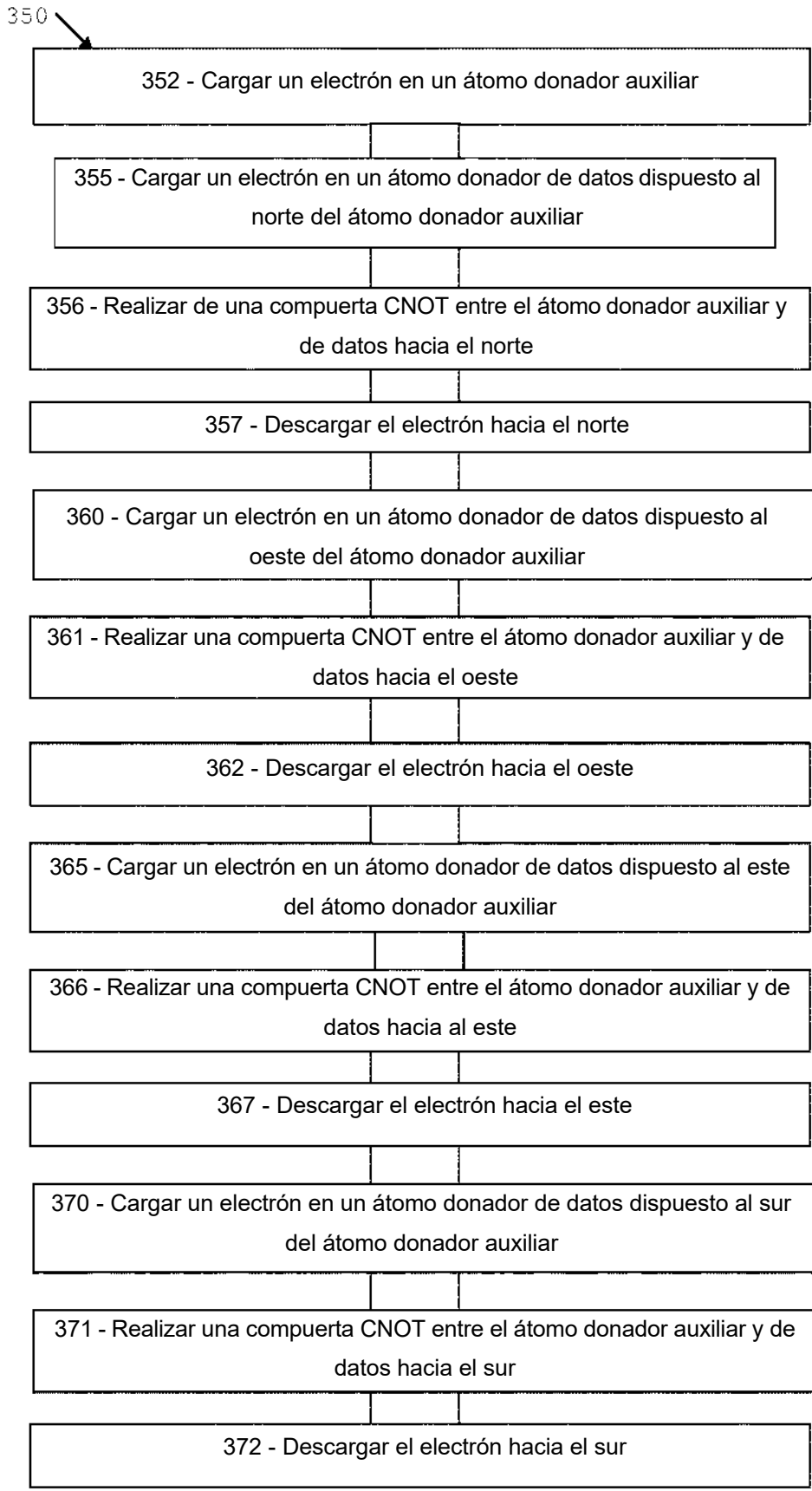


FIGURA 13

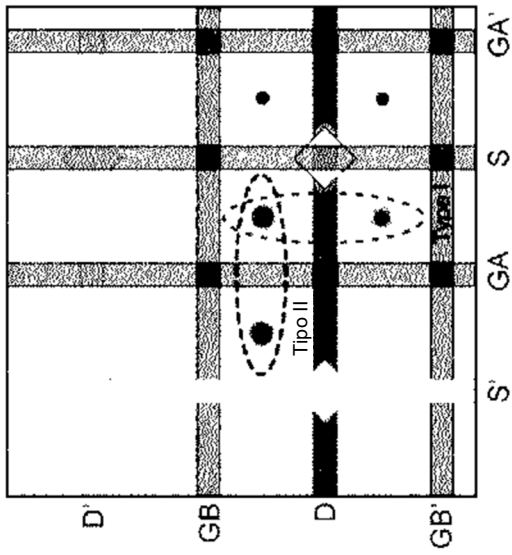


FIGURA 14(a)

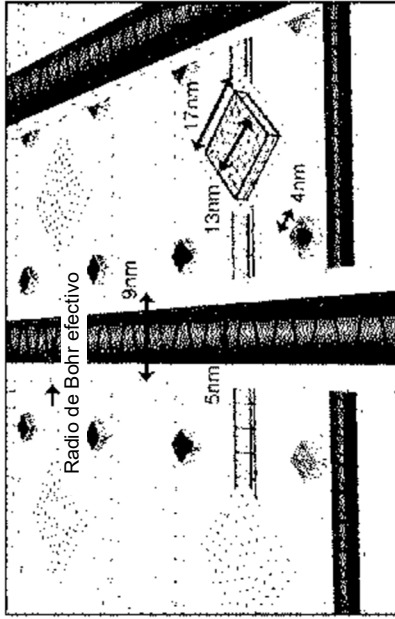


FIGURA 14(b)

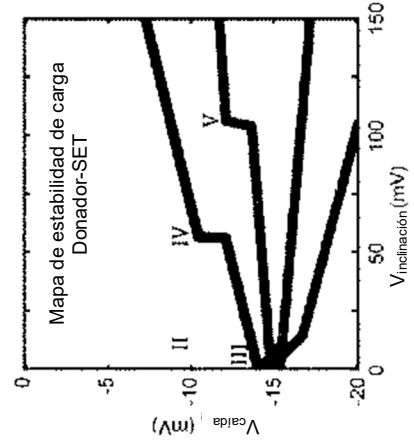


FIGURA 14(c)

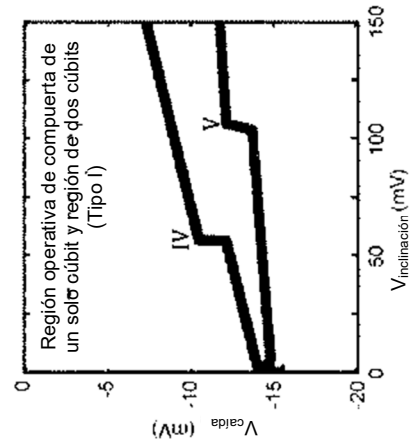


FIGURA 14(d)

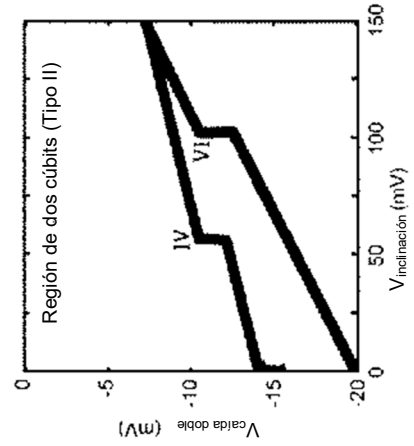


FIGURA 14(e)

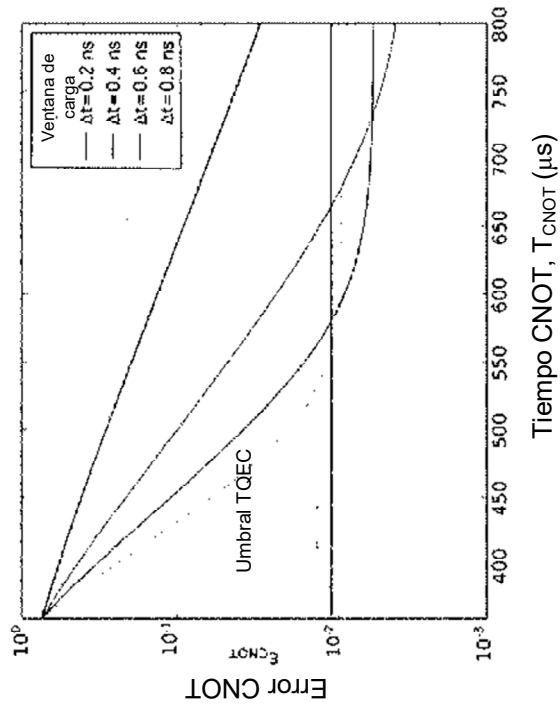


FIGURA 15(b)

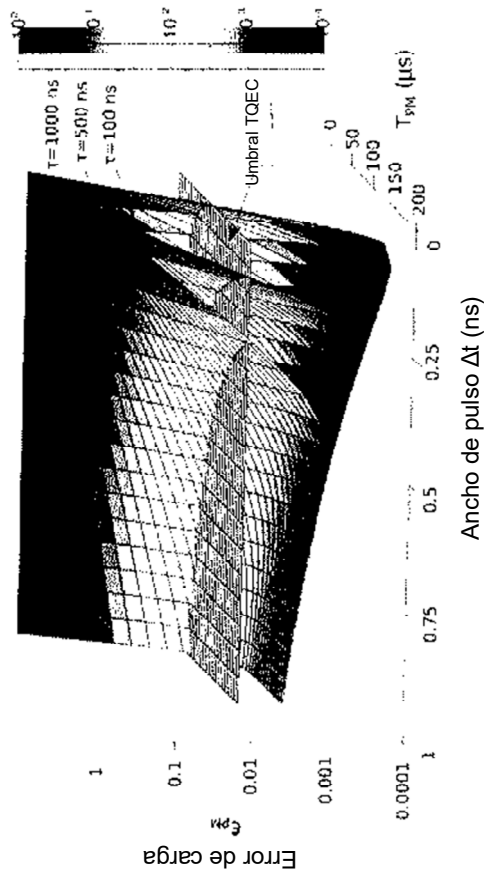


FIGURA 15(a)

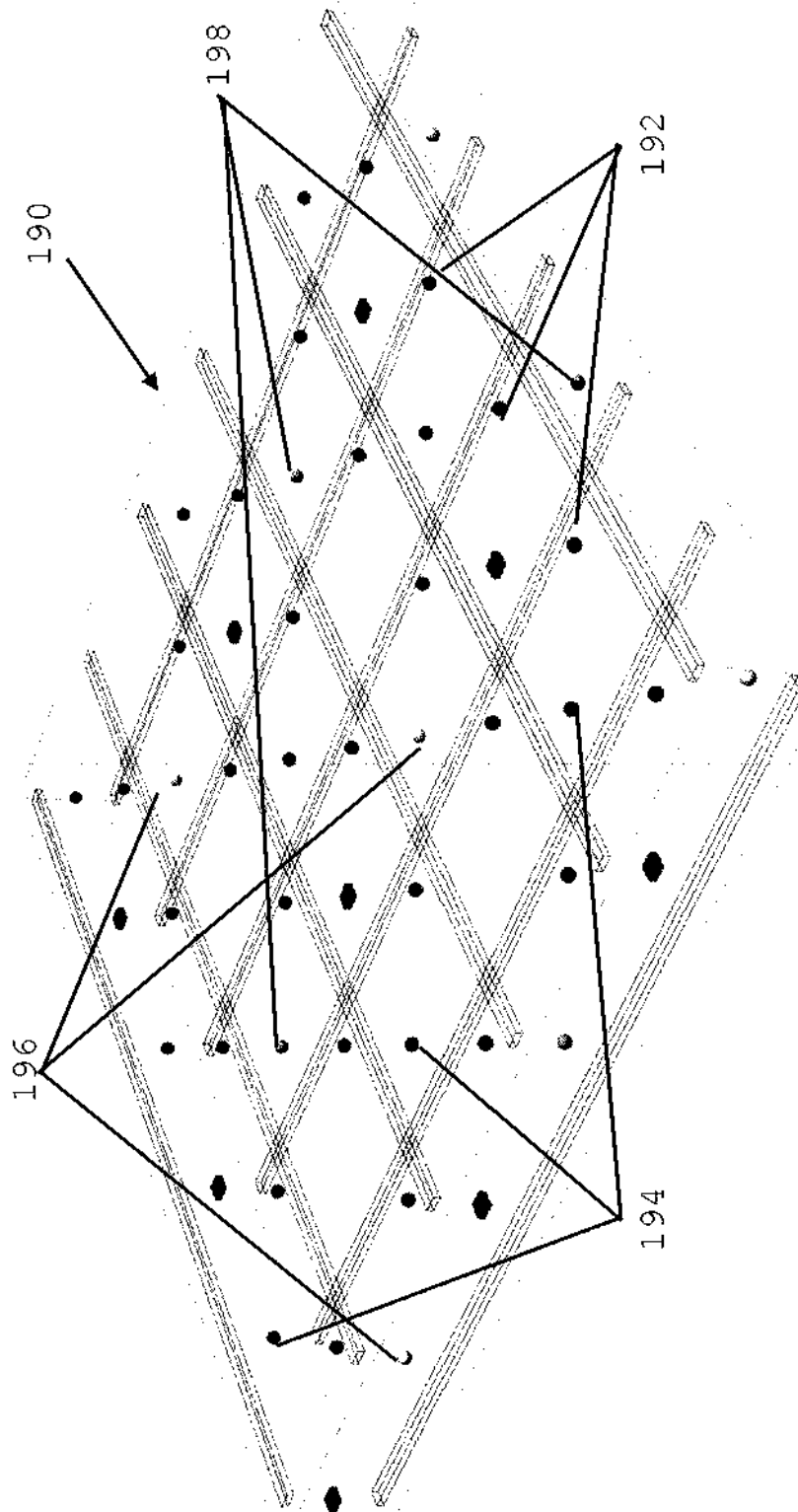


FIGURA 16