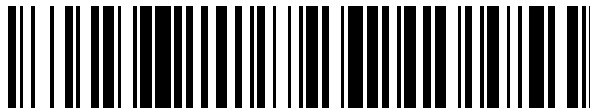


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 910 453**

51 Int. Cl.:

**G06N 10/00** (2012.01)

**B82Y 10/00** (2011.01)

**H03K 19/195** (2006.01)

**H01L 29/66** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.06.2014 PCT/AU2014/000596**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.12.2015 WO15184484**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.06.2014 E 14893855 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.01.2022 EP 3152153**

54 Título: **Aparato de procesamiento avanzado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**12.05.2022**

73 Titular/es:

**NEWSOUTH INNOVATIONS PTY LIMITED  
(100.0%)**

**Rupert Myers Building Gate 14, Barker Street  
University of New South Wales  
Sydney, NSW 2052, AU**

72 Inventor/es:

**DZURAK, ANDREW;  
VELDHORST, MENNO y  
YANG, CHIH-HWAN HENRY**

74 Agente/Representante:

**VIDAL GONZÁLEZ, Maria Ester**

ES 2 910 453 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**

Aparato de procesamiento avanzado

5 Campo de la Invención

La presente invención se refiere a un elemento de procesamiento para un aparato de procesamiento avanzado y, en particular, pero no exclusivamente, a un aparato de procesamiento cuántico y a un elemento de procesamiento para el aparato de procesamiento cuántico.

10 Antecedentes de la Invención

15 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 llega a un límite, ya que es difícil hacer más pequeñas las unidades funcionales actuales (tales como los MOSFET) sin afectar su operación.

20 La tecnología empleada para fabricar circuitos integrados de silicio convencionales se ha desarrollado durante los últimos 50 años y hoy en día está bien establecida. Los microprocesadores actuales cuentan con varios cientos de millones de transistores que se fabrican en líneas de alto rendimiento.

25 Se realizan desarrollos para implementar nuevos tipos de aparatos de procesamiento avanzado que pueden implementar cómputos potentes mediante el uso de un enfoque diferente al de los procesadores actuales. Tales aparatos de procesamiento avanzado prometen capacidades computacionales mucho más allá de los dispositivos actuales. Por ejemplo, se desarrollan procesadores cuánticos que pueden realizar cómputos de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica. Se han explorado enfoques para la realización de dispositivos para implementar bits cuánticos (cúbits), la unidad computacional básica de un procesador cuántico, con diferentes niveles de éxito.

30 Por ejemplo, los cúbits basados en semiconductores se han desarrollado y descrito en varias publicaciones de patentes anteriores, que incluyen los documentos US 6472681 (Kane), US 6369404 (Kane). Estos cúbits se basan en la explotación de los efectos cuánticos de un solo átomo dopante en una red cristalina de silicio. Aunque las propiedades de un solo átomo dopante en el silicio son prometedoras para implementar cúbits, las técnicas para fabricar estos dispositivos incluyen soluciones complejas de nanofabricación, como se discute, por ejemplo, en el documento US 7547648 (Ruess y otros).

35 También se ha propuesto codificar información cuántica mediante el uso de los estados de espín de los puntos cuánticos de semiconductores (Loss, DiVincenzo, DP quantum computation with quantum dots. Phys Rev. A56, 120; 1998). Esta propuesta preveía principalmente el uso de puntos cuánticos formados mediante el uso de puertas electrostáticas en una heteroestructura de GaAs/AlGaAs. Sin embargo, el tiempo de coherencia limitado y la fidelidad asociada del estado cuántico en estos sistemas representan un obstáculo significativo para la aplicación de puntos cuánticos en un procesador cuántico. Se ha realizado trabajo experimental en GaAs/AlGaAs en cúbits de puntos cuánticos, pero para realizar matrices a gran escala de tales estructuras será necesario desarrollar nuevas tecnologías de procesos de fabricación. Más importante aún, estos materiales sufren problemas de fidelidad y tiempo de desfase debido a la presencia de espines nucleares que son inherentes a la red cristalina de GaAs.

45 Resumen de la Invención

50 De acuerdo con un primer aspecto, la presente invención proporciona un elemento de procesamiento para un aparato de procesamiento avanzado, que comprende silicio y un material dieléctrico que forma una interfaz entre los materiales, una disposición de confinamiento para confinar uno o más electrones o huecos en el silicio para formar un punto cuántico, y una disposición de control para controlar una propiedad cuántica del punto cuántico para operar como un cúbit.

55 En una realización, el dieléctrico comprende sustancialmente dióxido de silicio. Se ha considerado anteriormente que la interfaz de silicio/dióxido de silicio proporciona un ambiente de desorden relativamente alto y, por lo tanto, no conduce a la formación de un punto cuántico viable que podría usarse en el procesamiento cuántico. Los Solicitantes han encontrado que puede lograrse un punto cuántico viable y que las propiedades cuánticas del punto cuántico pueden controlarse para operar como un cúbit, y, en una realización, con alta fidelidad de control.

60 La interfaz Si/SiO<sub>2</sub> ha sido un componente central de las tecnologías de circuitos integrados de semiconductores de óxido de metal complementario (CMOS) durante la mayor parte de las últimas dos décadas.

65 En una realización, la capa superficial de silicio en la que se forman los puntos cuánticos se enriquece isotópicamente para contener predominantemente átomos de <sup>28</sup>Si y, por lo tanto, esta realización aprovecha los largos tiempos de coherencia que quedan disponibles debido a la baja concentración de espín nuclear en la red de silicio. Todavía quedará un fondo de espín nuclear muy pequeño debido a la pequeña fracción restante de átomos

de  $^{29}\text{Si}$ . En una realización, una oblea de mango subyacente, que se separa bien espacialmente de los puntos cuánticos, puede comprender silicio de origen natural, que contiene del orden del 5 por ciento de átomos de  $^{29}\text{Si}$ .

5 En una realización, la disposición de control comprende un control dispuesto para sintonizar el punto cuántico de modo que la energía a la que se afecta el estado del punto cuántico pueda sintonizarse en un rango de valores de energía. En una realización, el punto cuántico se forma por uno o más electrones o huecos confinados y la propiedad cuántica comprende el espín del electrón o del hueco. El control se dispone para aplicar un voltaje para sintonizar la frecuencia de resonancia de espín del electrón o del hueco.

10 El fuerte acoplamiento espín-órbita en InAs ha permitido que los cúbits se realicen en puntos cuánticos dobles con distintos factores g efectivos de electrones o huecos. En el silicio, el acoplamiento espín-órbita es mucho más pequeño. Sin embargo, a pesar de esto, los Solicitantes han encontrado, sorprendentemente, que puede lograrse un punto cuántico altamente sintonizable. En una realización, donde el punto cuántico contiene un electrón o un hueco, 15 o varios electrones o huecos, los Solicitantes han encontrado que el campo eléctrico interno, que puede variarse hasta en 3MV/m, resulta en un cambio de Stark que puede sintonizar la frecuencia de resonancia de espín de los electrones (ESR) por más de 8 MHz. Este es un cambio sustancial en comparación con el ancho de línea de ESR, que es del orden de 2 kHz, debido al largo tiempo de coherencia de espín en el silicio enriquecido isotópicamente. Esto permite ventajosamente la sintonización del punto cuántico para que su estado pueda afectarse a diferentes frecuencias. Esto puede permitir ventajosamente el direccionamiento de muchos puntos cuánticos tal como este, lo 20 que facilita la posibilidad de sistemas de cúbit direccionables de voltaje a gran escala.

Es una ventaja adicional de al menos una realización de la invención, que un sistema que incorpora un elemento de procesamiento formado en una interfaz Si/SiO<sub>2</sub> pueda utilizar las tecnologías de fabricación que ya existen para la fabricación de transistores semiconductores de óxido de metal con efecto de campo MOSFET, que constituyen hoy 25 en día los procesadores informáticos.

En una realización, el elemento de procesamiento comprende un sustrato de silicio con una capa de dióxido de silicio formada sobre él, y varias puertas para la disposición de control formadas en metal sobre la capa de dióxido de silicio. Esto es muy similar a las estructuras MOSFET actuales. 30

De acuerdo con un segundo aspecto, la presente invención proporciona un aparato de procesamiento avanzado que comprende una pluralidad de elementos de procesamiento de acuerdo con el primer aspecto de la invención.

35 En una realización, se proporciona una disposición de control de intercambio para controlar la interacción de intercambio entre una pluralidad de elementos de procesamiento, para implementar el procesamiento cuántico. Por lo tanto, el aparato de procesamiento avanzado puede implementarse como un ordenador cuántico.

En una realización, se proporcionan líneas de control para sintonizar la pluralidad de puntos cuánticos a diferentes valores de energía de modo que sean direccionables individualmente o direccionables en grupos mediante señales electromagnéticas apropiadas para intercambiar el estado de los puntos cuánticos. 40

De acuerdo con el tercer aspecto, la presente invención proporciona un método de operación de un elemento de procesamiento cuántico, el elemento de procesamiento que comprende silicio y un material dieléctrico que forma una interfaz entre los materiales, una disposición de confinamiento para confinar uno o más electrones o huecos en el silicio para formar un punto cuántico, y una disposición de control para controlar una propiedad cuántica del punto 45 cuántico para operar como un cúbit, el método que comprende las etapas de aplicar una señal a través de la disposición de control para controlar la propiedad cuántica del punto cuántico.

50 En una realización, el método comprende la etapa adicional de aplicar una señal de control adicional para sintonizar el punto cuántico de modo que la energía a la que se afecta el estado del cúbit se ajuste a un valor de energía de un rango de valores de energía disponibles.

En una realización, la disposición de confinamiento se dispone para confinar uno o más electrones o huecos para formar un par de puntos cuánticos y la disposición de control se dispone para controlar un estado de singlete y 55 triplete del par de puntos cuánticos para codificar estados lógicos del cúbit y el método comprende la etapa de aplicar una señal a través de la disposición de control para controlar el estado del cúbit.

60 En otras realizaciones, la disposición de confinamiento se dispone para confinar uno o más electrones o huecos para formar al menos tres puntos cuánticos y la disposición de control se dispone para controlar los estados de espín de los al menos tres puntos cuánticos para codificar estados lógicos del cúbit y el método comprende la etapa de aplicar una señal a través de la disposición de control para controlar el estado del cúbit.

65 En una realización, el método comprende la etapa de aplicar señales de voltaje a la disposición de control para controlar los estados lógicos del cúbit al sintonizar una interacción de intercambio entre espines de los electrones o huecos en uno o más de los puntos cuánticos.

De acuerdo con un cuarto aspecto, la presente invención proporciona un método para implementar un elemento de procesamiento cuántico, que comprende las etapas de aplicar un campo eléctrico para formar un punto cuántico en una interfaz entre el silicio y un material dieléctrico, y aplicar un campo electromagnético adicional para afectar un estado cuántico del punto cuántico.

5 Las realizaciones ventajosas de la presente invención proporcionan un dispositivo de procesamiento cuántico que usa las propiedades cuánticas de un conjunto confinado de electrones o huecos ubicados alrededor de una interfaz entre una capa de silicio y una capa de dióxido de silicio. Los electrones o huecos pueden confinarse al aplicar un campo electrostático apropiado, a través de uno o más electrodos de puerta, a un área alrededor de la interfaz. Un bit cuántico puede realizarse al direccionar una propiedad cuántica, tal como el espín, de uno o más de los electrones o huecos confinados, a través de un estímulo electromagnético aplicado a través de uno o más electrodos de puerta, o mediante el uso de un campo electromagnético de AC aplicado externamente al dispositivo, o ambos.

15 Breve Descripción de los Dibujos

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

20 las Figuras 1 a 3 muestran vistas superiores y vistas transversales laterales de dispositivos de acuerdo con realizaciones de la presente invención;

la Figura 4 muestra una vista superior de un dispositivo de acuerdo con un ejemplo adicional;

25 la Figura 5 es una imagen SEM de un dispositivo de acuerdo con un ejemplo; y

las Figuras 6 a 12 muestran diagramas que ilustran los resultados experimentales obtenidos al realizar mediciones en el dispositivo de la Figura 5.

30 Descripción Detallada de los Ejemplos

Con referencia a la Figura 1, se muestra un elemento de procesamiento 100 de acuerdo con un ejemplo de la invención en vistas en planta (Figura 1(a)) y en sección transversal lateral (Figura 1(b)). El elemento de procesamiento 100 puede implementarse como un cúbit para un ordenador cuántico que comprende una pluralidad de estos elementos de procesamiento. En este ejemplo, el elemento de procesamiento comprende un sustrato de silicio 102 y un dieléctrico 104, en este ejemplo es dióxido de silicio. Se proporciona un electrodo de puerta 106 y puede operarse para formar un punto cuántico próximo a la interfaz Si/SiO<sub>2</sub>. La puerta 106 también se dispone para modificar una propiedad cuántica del punto cuántico. En este ejemplo, el punto cuántico puede comprender uno o más electrones o huecos y la propiedad cuántica que se controla es el factor g efectivo de los electrones o huecos. A lo largo de esta especificación, el término "factor g efectivo" se usa ampliamente para indicar una relación entre la frecuencia de resonancia de espín para el sistema de espín y el campo magnético de DC.

La puerta 106 también puede usarse para controlar directamente el espín de los electrones o los huecos mediante el uso de un campo eléctrico de AC.

45 Puede verse que la estructura del dispositivo que define el punto cuántico es similar a la puerta, el óxido de la puerta y el material semiconductor de un dispositivo MOS.

En más detalle, para el ejemplo mostrado en la Figura 1, el elemento de procesamiento 100 comprende una capa de silicio 102 cubierta por una capa de dióxido de silicio 104 y un electrodo de puerta 106. En este ejemplo, se usa silicio <sup>28</sup>Si enriquecido isotópicamente. El silicio <sup>28</sup>Si enriquecido isotópicamente puede ser una capa epitaxial que crece sobre un sustrato de silicio convencional. La Figura 1(b) es una vista en sección transversal de la estructura de la Figura 1(a) que muestra un área 122 donde pueden aislarse electrones o huecos. Los voltajes suficientemente positivos aplicados al electrodo de puerta 106 provocarán que los electrones se aislen en el área 122, mientras que los voltajes suficientemente negativos aplicados al electrodo de puerta 106 provocarán que los huecos se aislen en el área 122.

En este ejemplo, un solo electrón se aísla en el área 122, que forma por tanto un punto cuántico aislado y un solo cúbit se codifica en el espín del electrón aislado.

60 En ejemplos alternativos, un cúbit puede codificarse mediante el uso de los espines de múltiples electrones o huecos en un solo punto cuántico. En ejemplos alternativos adicionales, puede codificarse un solo cúbit en el espín de uno o más electrones o huecos de uno o más puntos cuánticos.

65 Con referencia ahora a la Figura 2, se muestra un elemento de procesamiento 200 de acuerdo con un ejemplo de la invención en vistas en planta (Figura 2 (a)) y en sección transversal lateral (Figura 2 (b)). En cuanto al elemento de

procesamiento 100 de la Figura 1, el elemento de procesamiento 200 comprende una capa 102 de silicio  $^{28}\text{Si}$  enriquecida isotópicamente cubierta por una capa de dióxido de silicio 104. Además del electrodo de puerta 106, el elemento de procesamiento 200 comprende dos electrodos de puerta adicionales 208 y 210. La Figura 2(b) es una vista en sección transversal de la estructura de la Figura 2(a) que muestra dos áreas 122 y 224 donde pueden aislarse electrones o huecos. Los voltajes suficientemente positivos aplicados a los electrodos de puerta 106 y 210 provocarán que los electrones se aislen en las áreas 122 y 224, mientras que los voltajes suficientemente negativos aplicados a los electrodos de puerta 106 y 210 provocarán que los huecos se aislen en las áreas 122 y 224.

En este ejemplo, uno o más electrones o huecos se aislan en cada una de las áreas 122 y 224, lo que por tanto forma dos puntos cuánticos. La estructura 200 puede usarse para realizar un par de cúbits, donde cada cúbit se codifica mediante el uso del espín de los electrones o los huecos en las regiones 122 y 224. En este caso, puede aplicarse un campo electromagnético al electrodo de puerta 208 para controlar el acoplamiento de los cúbits codificados en el espín de los electrones 122 y 224. Alternativamente, un solo cúbit puede mapearse en el par de puntos cuánticos 122 y 224 mediante el uso de los estados de triplete de espín  $m = \pm 1$ , el estado de triplete de espín  $m = 0$  y el estado de singlete de espín. Tales cúbits singlete-triplete no podrían depender de un gradiente de campo magnético de espines nucleares de la red como en el caso de los puntos cuánticos en GaAs, ya que estos están ausentes en el silicio enriquecido isotópicamente, sin embargo, podría realizarse un gradiente de campo magnético a través de un nano imán en el chip. Alternativamente, los voltajes aplicados a los electrodos de puerta 106 y 210 podrían usarse para controlar el factor  $g$  efectivo de los electrones o huecos. Además, puede usarse una combinación de voltajes aplicados a los electrodos de puerta 106, 208 y 210 para controlar el acoplamiento de intercambio entre espines en cada uno de los dos puntos cuánticos 122 y 224.

Con referencia ahora a la Figura 3, se muestra un elemento de procesamiento 300 de acuerdo con un ejemplo de la invención en vistas en planta (Figura 2 (a)) y en sección transversal lateral (Figura 2 (b)). En cuanto al elemento de procesamiento 200 de la Figura 2, el elemento de procesamiento 300 comprende una capa de silicio  $^{28}\text{Si}$  enriquecida isotópicamente 102 cubierta por una capa de dióxido de silicio 104. Además de los electrodos de puerta 106, 208 y 210, el elemento de procesamiento 300 comprende dos electrodos de puerta adicionales 308 y 310. La Figura 3(b) es una vista en sección transversal de la estructura de la Figura 3(a) que muestra tres áreas 122, 224 y 324 donde pueden aislarse electrones o huecos. Los voltajes suficientemente positivos aplicados a los electrodos de puerta 106, 210 y 310 provocarán que los electrones se aislen en las áreas 122, 224 y 324, mientras que los voltajes suficientemente negativos aplicados a los electrodos de puerta 106, 210 y 310 provocarán que los huecos se aislen en las áreas 122, 224 y 324.

En este ejemplo, se aislan uno o más electrones o huecos en cada una de las áreas 122, 224 y 324, lo que por tanto forma tres puntos cuánticos. La estructura 300 puede usarse para realizar tres cúbits, donde cada cúbit se codifica en el espín de los electrones o huecos en las regiones 122, 224 y 324. En este caso, puede aplicarse un campo electromagnético a los electrodos de puerta 208 y 308 para controlar el acoplamiento de los cúbits codificados en el espín de los electrones o los huecos en las regiones 122, 224 y 324. Alternativamente, un solo cúbit puede mapearse en los tres puntos cuánticos 122, 224 y 324 para implementar un espín del cúbit de solo intercambio, de manera análoga a la descrita por DiVincenzo y otros. (Nature 408, 339-342 (2000)). Los voltajes aplicados a los electrodos de puerta 106, 210 y 310 pueden usarse para controlar el factor  $g$  efectivo de los electrones y huecos. Además, puede usarse una combinación de voltajes aplicados a los electrodos de puerta 106, 208, 210, 308 y 310 para controlar el acoplamiento de intercambio entre espines en cada uno de los tres puntos cuánticos 122, 224 y 324.

La implementación de un cúbit del espín en un sistema de silicio-dióxido de silicio proporciona una mayor coherencia de espín en comparación con la mayoría de los semiconductores compuestos debido al acoplamiento hiperfino reducido del cúbit a los espines nucleares en el cristal anfitrión. El gas de electrones bidimensional confinado en la interfaz  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  puede agotarse para aislar los puntos cuánticos 122, 224 y 324 mediante el uso de un campo electrostático a través de las puertas 106, 208, 210, 308 y 310. También pueden emplearse otras estructuras de electrodos de puerta de superficie para ayudar en el confinamiento de los puntos cuánticos. En algunos ejemplos, pueden introducirse elementos adicionales en la interfaz para promover el confinamiento de electrones, tal como regiones dopadas o regiones dieléctricas. La concentración total de electrones en la interfaz puede modificarse mediante el uso de una puerta global aislada sobre el dispositivo, o mediante el uso de una puerta global aislada debajo del dispositivo.

El control del cúbit se obtiene generalmente a través de una señal electromagnética. La señal electromagnética puede aplicarse a puertas dispuestas alrededor del cúbit. En el ejemplo donde el cúbit se mapea al espín de un solo punto cuántico, también se aplica un campo magnético de DC para dividir los estados cuánticos y, de esta manera, definir los estados básicos lógicos del cúbit.

Anteriormente se había pensado que una interfaz de  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  tendría demasiados defectos, o que el  $\text{SiO}_2$  contendría demasiados centros de carga aleatorios, para permitir la realización de un punto cuántico que podría usarse como un cúbit. En comparación con otras interfaces de semiconductores que pueden usarse para confinar puntos cuánticos, tales como la interfaz de  $\text{Ga}/\text{GaAs}$ , la interfaz de  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  es un ambiente de desorden relativamente alto y, por lo tanto, se pensó que no era propicio para la operación de cúbit.

Los Solicitantes también han descubierto que, sorprendentemente, la frecuencia de la señal electromagnética de AC requerida para interactuar con el cúbit en su modo de solo electrón puede variarse al sintonizar el factor  $g$  del electrón y, por lo tanto, también su energía Zeeman. Por ejemplo, el factor  $g$  efectivo de los electrones o huecos confinados en el área 122 del elemento de procesamiento 100 puede variarse a través de una entrada electromagnética proporcionada a través de la puerta 106 o puertas eléctricas adicionales dispuestas alrededor del cúbit. La capacidad de sintonizar el cúbit puede facilitar la operación de un aparato de procesamiento avanzado que comprende muchos de estos cúbits. Los cúbits pueden direccionarse o controlarse al variar el factor  $g$  efectivo de los electrones o huecos que componen el cúbit. Esta técnica de control permite el direccionamiento de cúbits individualmente o en grupos.

Ahora se describirá un ejemplo más detallado de un elemento de procesamiento de acuerdo con la presente invención con referencia a la Figura 4. El ejemplo representado en la Figura 4 puede usarse para implementar operaciones de un solo cúbit. En una arquitectura escalable con muchos cúbits, se usaría una variación de esta realización. En particular, se usaría un módulo de detección de cúbits más compacto. La Figura 4 muestra una vista superior de una estructura de electrodos 400 para interactuar con un cúbit en un sistema Si/SiO<sub>2</sub>. El módulo cúbit 402 comprende una puerta de confinamiento 404, dos puertas 406 y 408 que pueden inducir puntos cuánticos 407 y 409 debajo de ellos, y dos puertas de barrera 410 y 420.

El módulo sensor 430 comprende dos puertas de barrera 432 y 434, y la puerta de transporte 436. La estructura 400 también comprende una puerta de depósito 442 y una puerta de control 452.

Pueden adoptarse diferentes configuraciones geométricas y de polarización de las puertas 404, 406, 408, 410 y 420 para crear uno o más puntos cuánticos. En este ejemplo particular, la puerta 406 puede polarizarse positivamente para crear un solo punto cuántico 407 directamente debajo de la interfaz Si/SiO<sub>2</sub> y debajo del módulo cúbit 402. El área debajo del módulo cúbit 402 se acopla en túnel con el área debajo de la puerta del depósito 442 y se posiciona en la proximidad del módulo sensor 430. Esto permite mejorar la sensibilidad de lectura a través de la estructura de transistor de un solo electrón operada mediante el uso de los electrodos 432, 434 y 436. La puerta de control 452 se usa para proporcionar un estímulo electromagnético de AC adecuado que se acopla con el cúbit a una frecuencia dada para modificar un estado del cúbit.

En algunos ejemplos, el campo electromagnético creado por una corriente que fluye a través de la puerta de control 452 puede interactuar con el cúbit mediante resonancia de espín del electrón (ESR) para modificar el estado del cúbit.

La frecuencia de ESR del cúbit puede sintonizarse al modificar el factor  $g$  efectivo del electrón confinado de modo que la interacción con el cúbit solo sea posible a una frecuencia particular. La frecuencia del campo magnético de AC, generada por la línea de control 452, puede variarse para interactuar con diferentes cúbits, cada uno con una frecuencia de ESR respectiva, lo que proporciona la posibilidad de direccionar por separado cada uno o un subconjunto de cúbits en una matriz de cúbits.

A pesar del pequeño acoplamiento espín-órbita en Si, al usar la estructura 400, el factor  $g$  efectivo del electrón confinado puede sintonizarse al modificar uno o más voltajes de puerta en el módulo cúbit 402. El campo eléctrico interno en la vecindad de los puntos cuánticos puede variarse hasta en 3 MV/m, lo que resulta en un cambio de Stark que puede sintonizar la frecuencia de ESR del electrón por más de 8 MHz. Debido al ancho espectral de ESR muy estrecho en <sup>28</sup>Si, que se ha medido en un dispositivo alrededor de 2 kHz, la frecuencia de operación del cúbit puede sintonizarse por más de 3000 veces el ancho espectral de línea de ESR mínimo.

Las estructuras mostradas en las Figuras 1 a 4 son compatibles con los métodos de fabricación y equipos de fabricación comunes en la industria microelectrónica, en particular en el campo de los circuitos integrados de muy alta densidad en base a los MOSFET. Esto proporciona potencial para la escalabilidad del cúbit descrito genéricamente en la Figura 1 a 3 a arquitecturas que comprenden una pluralidad de cúbits, cada uno direccionable de forma singular mediante la operación de voltajes de puerta respectivos.

Con referencia ahora a la Figura 5, se muestra una imagen SEM de un dispositivo 300 fabricado mediante el uso de una tecnología MOS de silicio de pila de puerta de varios niveles. El dispositivo 500 incorpora todos los componentes discutidos para la estructura 400 de la Figura 4. El dispositivo 500 se fabrica sobre una epicapa de <sup>28</sup>Si enriquecida isotópicamente, que crece epitaxialmente, con una concentración residual de <sup>29</sup>Si a 800 ppm y un grosor de epicapa de alrededor de 1 micrómetro. La puerta de control 452 se realiza en forma de una línea de transmisión en chip 552 para manipular los estados de espín del punto cuántico mediante el uso de pulsos de ESR. El módulo sensor 430 se proporciona en forma de un solo transistor de electrones (SET) adyacente a la estructura de puntos cuánticos y comprende líneas conductoras 532, 534 y 536. El SET se usa como un sensor para monitorear la ocupación de electrones dentro del punto cuántico. En ejemplos alternativos no reivindicados, el módulo sensor 430 puede proporcionarse en forma de un punto de contacto cuántico (QPC), una estrecha constricción en una región conductora o construcciones alternativas que son sensibles a los campos eléctricos.

Para controlar el cúbit 502, puede aplicarse un pulso de microondas a la línea de transmisión en el chip 552 para crear un campo magnético de AC local 504 que impulsa las transiciones entre los estados de espín abajo y hacia arriba del (de los) electrón(es) confinado(s) en el punto cuántico. Cuando se aplica un campo magnético de DC externo al dispositivo con una magnitud  $B_{DC} = 1,4$  T, por ejemplo, la frecuencia de resonancia del punto cuántico  $u_0 = (g^* \mu_B / h) B_{DC} = 39,14$  GHz. Aquí, el valor del factor  $g$  efectivo para el electrón confinado es aproximadamente  $g^* = 1,998$ . Un pulso de microondas aplicado a la línea de transmisión 552 a la frecuencia de resonancia  $u_0$ , como se definió anteriormente, luego impulsará las transiciones entre los estados lógicos del cúbit. Con referencia ahora a la Figura 6, se muestra un diagrama de estabilidad de carga de voltaje pulsado 600 cuando se aplica un pulso cuadrado de 40 mV pico a pico a 174 Hz al electrodo 504. El diagrama 600 demuestra el agotamiento del último electrón en el punto. La escala de grises indica el exceso de ocupación de electrones ( $\Delta N$ ) en el punto para cada adición de carga. El diagrama 650 muestra un ejemplo de mediciones de lectura de espín de un solo disparo para el último electrón, mediante el uso de conversión de espín a carga. Al cambiar el voltaje en el electrodo 504, el punto cuántico puede cargarse o vaciarse. Esto permite realizar lecturas de espín en una medición de un solo disparo a través de túneles selectivos de energía. Las mediciones que se muestran en la Figura 6 se realizan en un refrigerador de dilución con temperatura base  $T = 50$  mK y un campo magnético de DC  $B_{DC} = 1,4$  T.

El diagrama de estabilidad para el punto cuántico se obtiene al combinar detección de carga y pulsos de puerta con compensación dinámica de voltaje. El agotamiento del último electrón en el punto se observa claramente en la Figura 6(a), sin transiciones de carga adicionales para  $V_{G4}$  (elec 304)  $< 1,6$  V. El acoplamiento del túnel entre el punto y el depósito 342 se sintoniza mediante el uso de la puerta de barrera  $G_3$  510 para producir un tiempo de túnel  $t \sim 100$   $\mu$ s.

Durante un tiempo de operación de 30  $\mu$ s, el cúbit demuestra oscilaciones coherentes que coinciden con  $f_t^* = \Omega^2 / \Omega_R^2 \sin^2(\Omega R \tau / 2)$ , lo que implica que el cúbit no tiene una decoherencia significativa sobre esta escala de tiempo. La Figura 7 muestra las oscilaciones sinusoidales de Rabi 700 obtenidas al variar la longitud del pulso de ESR  $\tau_p$ , sin una disminución significativa de las oscilaciones observadas durante 30  $\mu$ s, que es la longitud máxima del pulso que se muestra en la Figura 8 que muestra el diagrama 800 que informa las oscilaciones mientras se varía la frecuencia  $\nu_{ESR}$ . La confirmación de que estas son oscilaciones de Rabi se deduce de la dependencia  $f_{Rabi} \propto B_1 \propto P_{ESR}^{1/2}$  como se muestra en el recuadro 810, donde  $P_{ESR}$  es la potencia de la fuente de microondas aplicada, y también del aumento en la frecuencia de Rabi para una frecuencia de desintonización distinta de cero.

Cuando la frecuencia de desintonización es distinta de cero, surgen oscilaciones coherentes conocidas como franjas de Ramsey cuando el espín apunta en el plano x-y de la esfera de Bloch. Estas franjas pueden detectarse al aplicar dos pulsos  $n/2$  separados por un tiempo de retardo  $\tau$ , seguidos de la lectura del estado de espín.

Con referencia ahora a la Figura 9(a), se muestra un gráfico 900 que informa de las oscilaciones de Ramsey resultantes, y puede extraerse un tiempo de disminución característico  $T_2^* = 140$   $\mu$ s de las oscilaciones 900. El ancho de línea espectral correspondiente  $1/\pi T_2^* = 2,6$  kHz está cerca del ancho pico de ESR medido más pequeño  $\Delta\nu = (2,4 \pm 0,2)$  kHz medido en  $P_{ESR} = -40$  dBm. Esta es una mejora dramática en  $T_2^*$  en comparación con otros sistemas de cúbit de espín de punto cuántico y es una demostración directa de la importancia de eliminar las fluctuaciones aleatorias en el campo magnético provocadas por espines nucleares de red.

Los cambios ambientales lentos entre eventos individuales de lectura de un solo disparo son uno de los principales factores que conducen a la disminución de las franjas de coherencia de Ramsey. Para eliminar los efectos de este ruido, puede aplicarse una técnica de eco de Hahn, donde se aplica un pulso  $\pi_x$  exactamente entre dos pulsos  $\pi_x/2$ , como se muestra en la Figura 9(b). A partir de esto medimos un tiempo de coherencia de espín  $T_2^H = 1,2$  ms. La amplitud del eco de Hahn disminuye con un exponente  $\eta = 2,2$ , lo que indica que la fuente dominante de decoherencia es el ruido  $1/f$ . Puede obtenerse un aumento adicional del tiempo de coherencia al aplicar una secuencia CPMG, donde se aplican una serie de pulsos  $\pi_y$  para reenforzar la señal.

La Figura 10(a) muestra una disminución de eco 920 obtenido al aplicar pulsos  $\pi_y$  500, con un tiempo de coherencia resultante de  $T_2^{CPMG} = 28$  ms.

La fidelidad de medición  $F_M = 92$  % y la fidelidad de inicialización  $F_T = 95$  % se limitan principalmente por el ensanchamiento en el depósito de electrones. La fidelidad de control intrínseco  $F_C$  de un pulso  $\pi$  puede calcularse mediante el uso del período de oscilación de Rabi  $\tau_{2\pi} = 3,4$   $\mu$ s de la Figura 7 junto con  $T_2^*$ , y encontramos  $F_C = 99,999$  %.

La Figura 10(b) muestra una medición de la fidelidad del control al medir la disminución de la fracción de espín arriba como una función del número de pulsos  $\pi$  en una secuencia CP 930. Los errores de ángulo de giro son aditivos en esta secuencia, y de la disminución puede extraerse una fidelidad de control  $> 99,99$  %. Esto sugiere que los errores de pulso surgen del ancho de línea espectral ensanchado debido al desfase. Por lo tanto, este cúbit de espín tiene una fidelidad de control que satisface el requisito estricto de los códigos de corrección de errores cuánticos tolerantes a fallas. Esto no se ha observado en otros sistemas de puntos cuánticos.

Se ha propuesto que el cómputo cuántico tolerante a fallos podría ser posible con tolerancias de error de hasta el 1 % mediante el uso de códigos de superficie. En el dispositivo cuántico descrito en la siguiente descripción, puede proporcionarse un control completo sobre la esfera de Bloch al explotar la fase y la duración del pulso de ESR aplicado.

El recuadro 940 en la Figura 10(b) muestra  $n/2$  pulsos aplicados con una diferencia de fase que aumenta, que se usaron para calibrar el ángulo de giro  $\theta$ . El ajuste de los datos muestra un error de frecuencia y fase despreciable en comparación con el error de control efectivo, lo que demuestra que la esfera de Bloch completa puede evaluarse con alta fidelidad.

El campo eléctrico vertical  $F_z$  en nuestro punto cuántico puede sintonizarse en un amplio rango al aumentar el voltaje en G4 (electrodo 504), mientras se reduce el voltaje en C (electrodo 505) para mantener una ocupación de electrones de  $N = 1$ . Los experimentos en puntos de silicio han mostrado un anticruce de los estados de espín y valle, como se muestra en el recuadro 960 en la Figura 11, debido al acoplamiento espín-órbita, que ocurre en una pequeña ventana de energía de  $neV$  a  $\mu eV$ , en dependencia de la rugosidad de la interfaz. La magnitud de la división del valle  $E_{vs}$  puede medirse mediante el uso de una técnica de relajación de espín de punto caliente como una función del voltaje de la puerta. La Figura 11 muestra los resultados 950 de estas mediciones. Se mide una dependencia lineal de  $E_{vs}$  sobre  $F_z$  que difiere por solo un 12 % de un dispositivo similar informado anteriormente por Yang y otros. (Nature Communications v4, p4069 (4013)).

La Figura 12 es un gráfico 970 de la frecuencia de resonancia del cúbit como una función de un voltaje de puerta aplicado en el punto cuántico ( $V_C$ ) debido a un cambio de Stark pequeño pero finito. La línea roja es un ajuste mediante el uso de  $g(|F_z|)/g(0) - 1 = \eta_2|F_z|^2$ , con  $\eta_2 = 2,2 \text{ nm}^2/V^2$ . El campo eléctrico vertical  $F_z$  (eje superior) se calcula a partir de los voltajes de puerta aplicados.

El mismo campo eléctrico interno que es para sintonizar la división del valle también puede usarse para sintonizar la frecuencia de resonancia del cúbit por más de 8 MHz, lo que corresponde a más de 3000 veces el ancho de línea de ESR mínimo observado. Esta fuerte capacidad de sintonizar es notable para un sistema con estos largos tiempos de coherencia y proporciona excelentes posibilidades de escalabilidad. El dispositivo descrito en esta realización puede operarse en regímenes tanto por encima como por debajo del anticruce de valle del espín sin un impacto perceptible en la dependencia de frecuencia de ESR con  $F_z$ . Esto proporciona un dispositivo de cúbit direccionable por puerta con alta fidelidad que opera muy lejos del punto de anticruce del valle, donde cae el tiempo de relajación.

En un ejemplo adicional, el elemento de procesamiento puede implementarse mediante el uso de una sola puerta de control en una pila de silicio dieléctrico, que crea una estructura MOS. La puerta de control única en este ejemplo puede tener señal(es) electromagnética(s) aplicada(s) para crear un solo punto cuántico, y también puede interactuar con el punto cuántico para operar el punto cuántico como un cúbit.

El excelente direccionamiento de puerta del elemento de procesamiento de los ejemplos descritos anteriormente abre la posibilidad de que muchos cúbits se integren en un solo chip, con campos magnéticos de AC globales aplicados a través de una cavidad o líneas de transmisión en el chip para realizar operaciones de un solo cúbit. Luego, las operaciones de dos cúbits pueden lograrse a través del control de puerta y el acoplamiento de intercambio entre pares de puntos cuánticos. Por lo tanto, puede realizarse un aparato de procesamiento avanzado que comprende muchos cúbits de acuerdo con los ejemplos de la presente invención. Una línea de control por cúbit puede ser suficiente. Puede realizarse un potencial de confinamiento con una puerta diseñada como una cuadrícula grande y una puerta superior para cada cúbit para direccionar y controlar el acoplamiento de intercambio a los otros cúbits.

Además, la estructura del dispositivo que se usa aquí puede modificarse fácilmente para usar electrodos de puerta de poli-silicio y tecnologías de fabricación estándar de semiconductores de óxido de metal complementario (CMOS) que se usan actualmente para fabricar más de un billón de transistores en un solo chip.

En los ejemplos anteriores, el dieléctrico es dióxido de silicio. Sin embargo, la invención no se limita a este dieléctrico y pueden utilizarse otros dieléctricos en lugar de  $\text{SiO}_2$ ,

El elemento de procesamiento de los ejemplos anteriores puede operarse a temperaturas muy bajas, en el orden de 0,1 a 1 K, preferentemente alrededor de 0,5 K. Se proporciona un aparato de enfriamiento apropiado.

También se proporcionan fuentes de voltaje y fuentes de señal apropiadas para el control del elemento de procesamiento. Algunas o todas estas fuentes de voltaje y señal podrían integrarse en el chip del procesador mediante el uso de microelectrónica convencional, o pueden proporcionarse por un chip controlador auxiliar.

En algunos de los ejemplos descritos anteriormente, la resonancia de espín del electrón se usa para alterar los espines de los cúbits. La invención no se limita a esto y pueden usarse alternativas. Por ejemplo, puede usarse un pulso de voltaje para controlar los estados del cúbit, particularmente para las realizaciones de cúbit de dos o tres puntos.

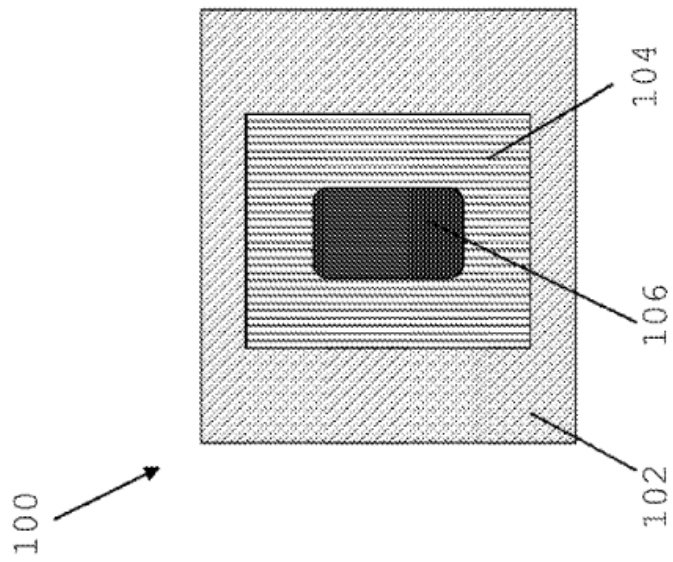
En algunos de los ejemplos descritos anteriormente, el estado cuántico afectado es el espín. El "espín" es el giro de un solo electrón, o el giro de un solo hueco, o puede ser el giro compuesto de dos o más electrones o huecos, para que los cúbits utilicen dos o más electrones o huecos.

- 5 Los ejemplos anteriores describen cúbits formados por uno, dos o tres puntos cuánticos. Los cúbits pueden formarse por cuatro o más puntos cuánticos.

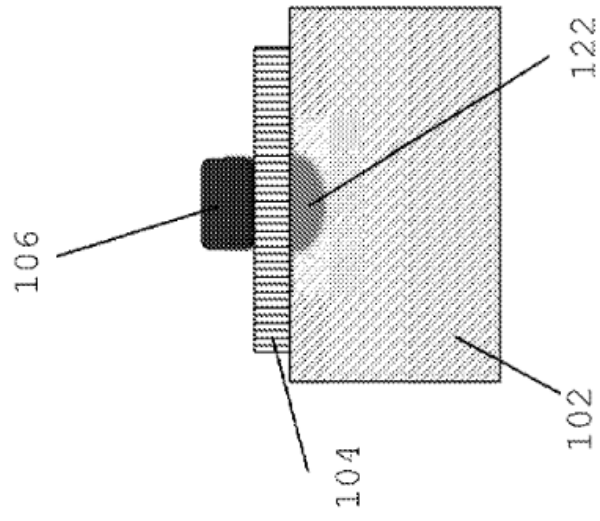
**REIVINDICACIONES**

1. Un elemento de procesamiento (100; 200; 300) para un aparato de procesamiento avanzado, que comprende silicio (102) y un material dieléctrico (104) que forman una interfaz entre los materiales, y una disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) para controlar el espín de los electrones o los huecos de un punto cuántico para operar el punto cuántico como un cúbit, caracterizado por una disposición de confinamiento (106; 210; 310; 402; 504; 505) que comprende uno o más electrodos de puerta dispuestos para que tengan un voltaje suficientemente positivo aplicado para producir un campo electrostático para aislar y confinar uno o más electrones en silicio (102) para formar el punto cuántico o para que tengan un voltaje suficientemente negativo aplicado para producir un campo electrostático para aislar y confinar uno o más huecos en silicio (102) para formar el punto cuántico.
2. Un elemento de procesamiento (100; 200; 300) de acuerdo con la Reivindicación 1, caracterizado porque la disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) comprende un control dispuesto para sintonizar el punto cuántico de modo que la energía en la que se afecta el estado del cúbit pueda ajustarse en un rango de valores de energía.
3. Un elemento de procesamiento de acuerdo con cualquiera de las Reivindicaciones anteriores, en donde la disposición de confinamiento (106; 210; 210; 308; 402; 504; 505) comprende al menos dos electrodos dispuestos para que tengan un voltaje suficientemente positivo o suficientemente negativo aplicado para producir un campo electrostático para confinar respectivamente al menos dos electrones o al menos dos huecos para formar un par de puntos cuánticos, y la disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) se adapta para controlar un estado de singlete y triplete del par de puntos cuánticos para codificar estados lógicos del cúbit.
4. Un elemento de procesamiento (100, 200, 300) de acuerdo con cualquiera de las Reivindicaciones anteriores, en donde la disposición de confinamiento (106; 210; 310; 402; 504; 505) comprende al menos tres electrodos dispuestos para que tengan un voltaje suficientemente positivo o suficientemente negativo aplicado para producir un campo eléctrico para confinar respectivamente al menos tres electrones o al menos tres huecos para formar al menos tres puntos cuánticos, y la disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) se adapta para controlar los estados de espín de los al menos tres puntos cuánticos para codificar los estados lógicos de los cúbits.
5. Un elemento de procesamiento (100, 200, 300) de acuerdo con la Reivindicación 3, caracterizado porque los estados lógicos de los cúbits se controlan mediante pulsos de voltaje aplicados a la disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) para sintonizar una interacción de intercambio entre espines de los electrones o los huecos en uno o más de los puntos cuánticos.
6. Un elemento de procesamiento (100, 200, 300) de acuerdo con la Reivindicación 1, la disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) que comprende un electrodo de puerta dispuesto para que tenga un voltaje aplicado para sintonizar la frecuencia de resonancia de espín del electrón o del hueco.
7. Un elemento de procesamiento (100, 200, 300) de acuerdo con la Reivindicación 6, caracterizado porque la disposición de control (452, 552) comprende una línea de transmisión (452, 552) integrada con el silicio en la proximidad del punto cuántico, para que sea capaz de afectar el espín del electrón o del hueco.
8. Un elemento de procesamiento (100, 200, 300) de acuerdo con la Reivindicación 6 o la Reivindicación 7, que comprende una disposición de lectura (430) para leer el estado del cúbit; la disposición de lectura que comprende un transistor de un solo electrón (SET) (432; 434; 436; 532; 534; 536) o un punto de contacto cuántico (QPC) dispuesto para detectar un evento de tunelización de electrones o huecos y un electrodo capacitivamente acoplado al elemento de procesamiento.
9. Un aparato de procesamiento avanzado, que comprende una pluralidad de elementos de procesamiento (100, 200, 300) de acuerdo con cualquiera de las Reivindicaciones anteriores dispuestos en una matriz dentro de un sustrato de Si.
10. Un aparato de procesamiento avanzado de acuerdo con la Reivindicación 9, que comprende una disposición de control de intercambio (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) para controlar una interacción de intercambio entre una pluralidad de elementos de procesamiento (100; 200; 300), para implementar el procesamiento cuántico.
11. Un aparato de procesamiento avanzado de acuerdo con la Reivindicación 9 o la Reivindicación 10, caracterizado porque la disposición de control (106; 208; 210; 308; 310; 452; 552) comprende una o más líneas de control que se disponen para interactuar con la pluralidad de elementos de procesamiento (100; 200; 300) de tal manera que cada elemento de procesamiento sea direccionable individualmente o los elementos de procesamiento sean direccionables en grupos.

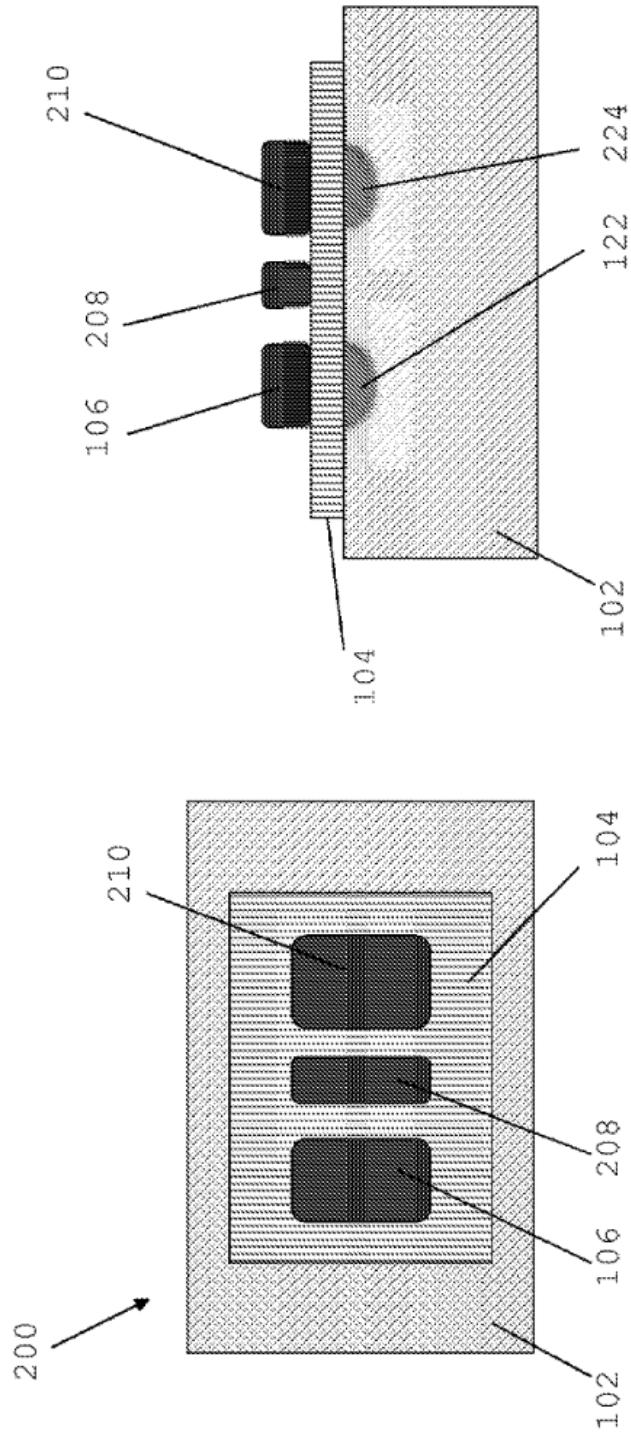
12. Un método de operación de un elemento de procesamiento cuántico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, el método que comprende las etapas de:
- 5        aplicar un voltaje suficientemente positivo para producir un campo electrostático para aislar y confinar uno o más electrones en el silicio para formar uno o más puntos cuánticos o aplicar un voltaje suficientemente negativo al uno o más electrodos de puerta para producir un campo electrostático para confinar uno o más huecos en el silicio para formar uno o más puntos cuánticos y
- 10        aplicar una señal de control a través de la disposición de control para operar el uno o más puntos cuánticos como cúbits.
13. Un método de acuerdo con la Reivindicación 12, que comprende la etapa adicional de aplicar una señal de control adicional para sintonizar el punto cuántico para que la energía a la que se afecta el estado del cúbit se ajuste a un valor de energía de un rango de valores de energía disponibles.
- 15    14. Un método de acuerdo con la Reivindicación 12 o la Reivindicación 13 que comprende la etapa de aplicar señales de voltaje a la disposición de control para controlar los estados lógicos de los cúbits al sintonizar una interacción de intercambio entre espines de electrones o huecos en uno o más de los puntos cuánticos.



**Figure 1(a)**

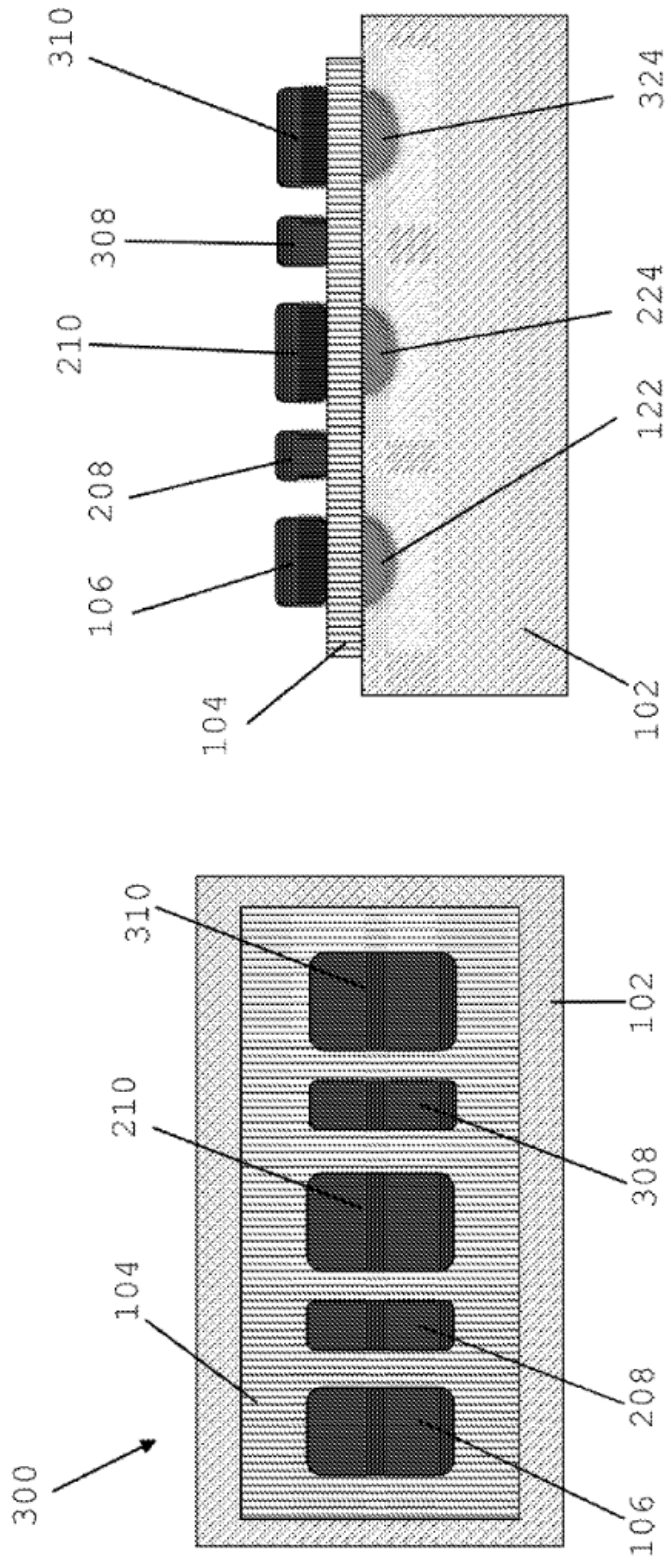


**Figure 1(b)**



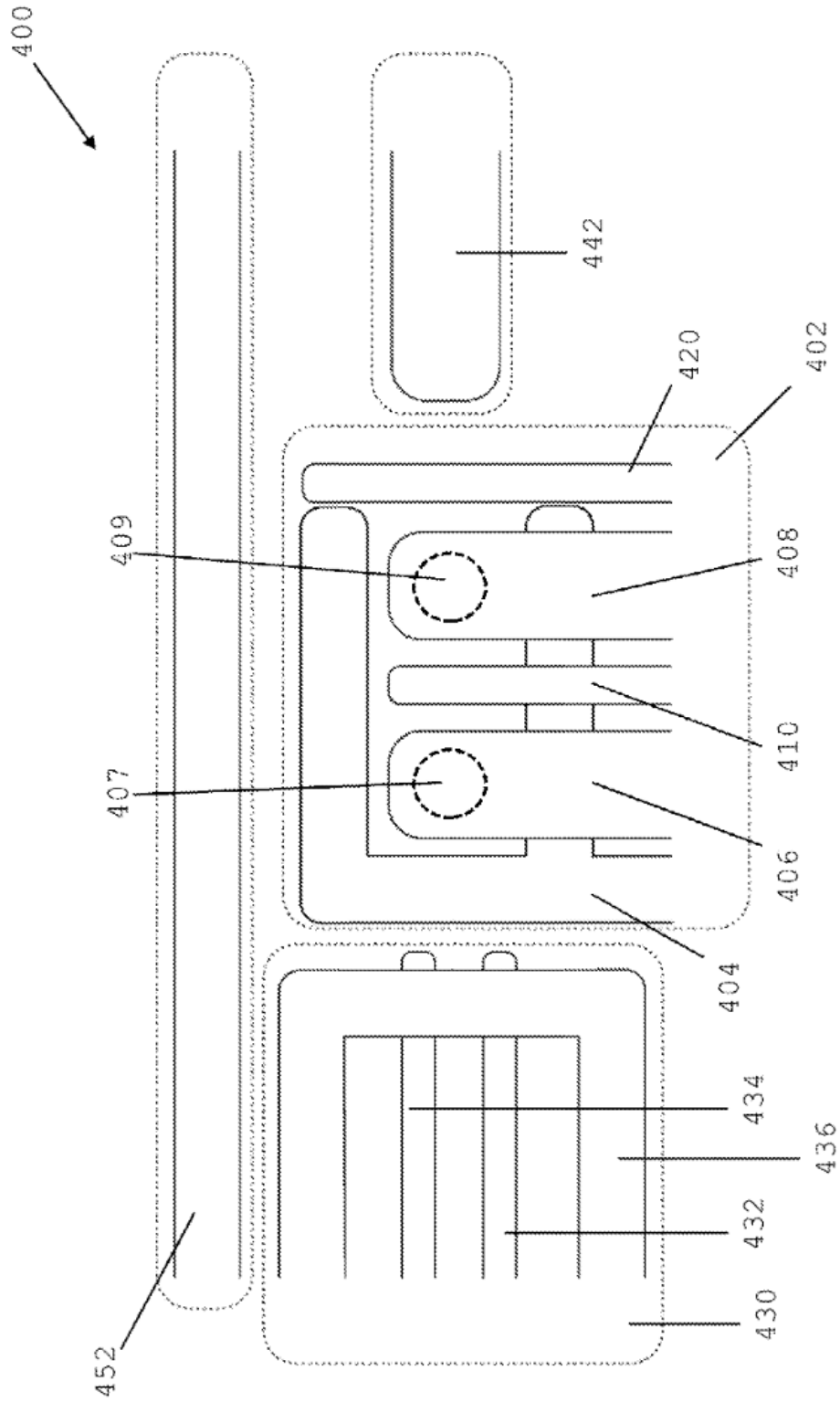
**Figura 2(b)**

**Figura 2(a)**



**FIGURE 3(b)**

**Figura 3(a)**



**Figura 4**

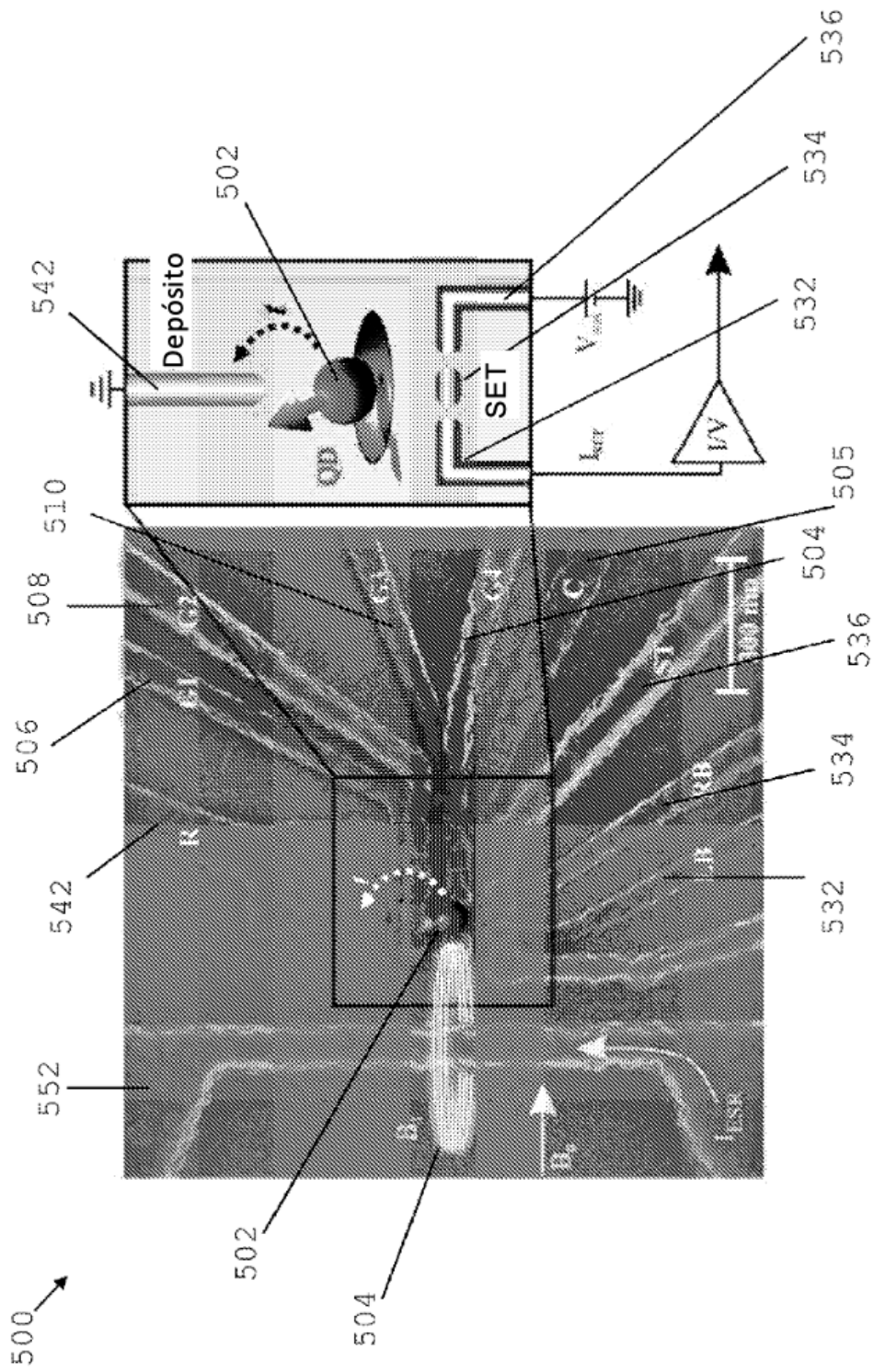


Figura 5

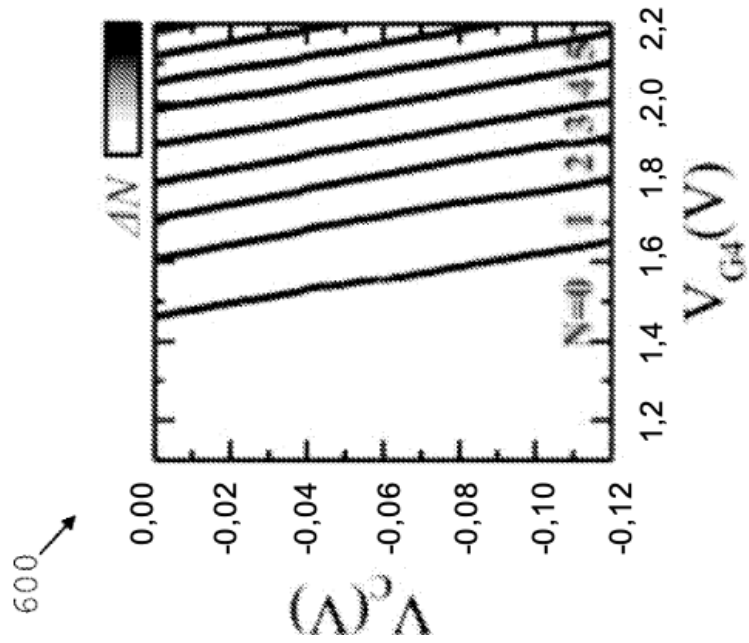


Figura 6(a)

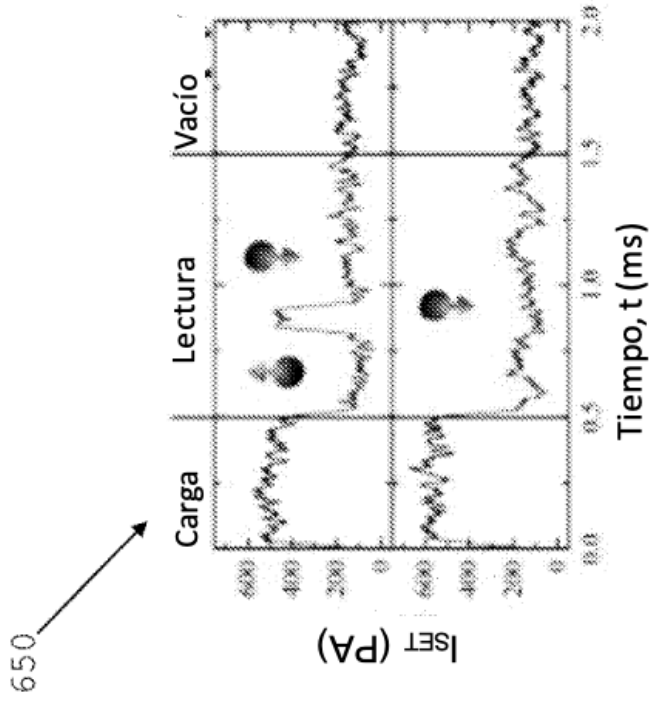
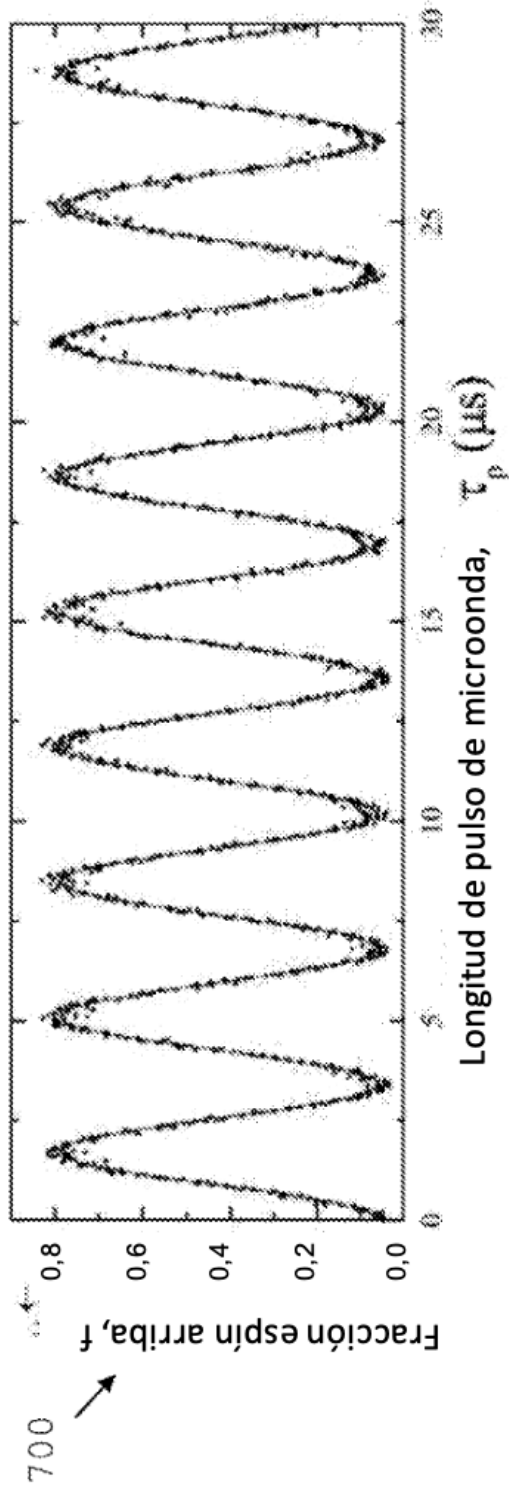
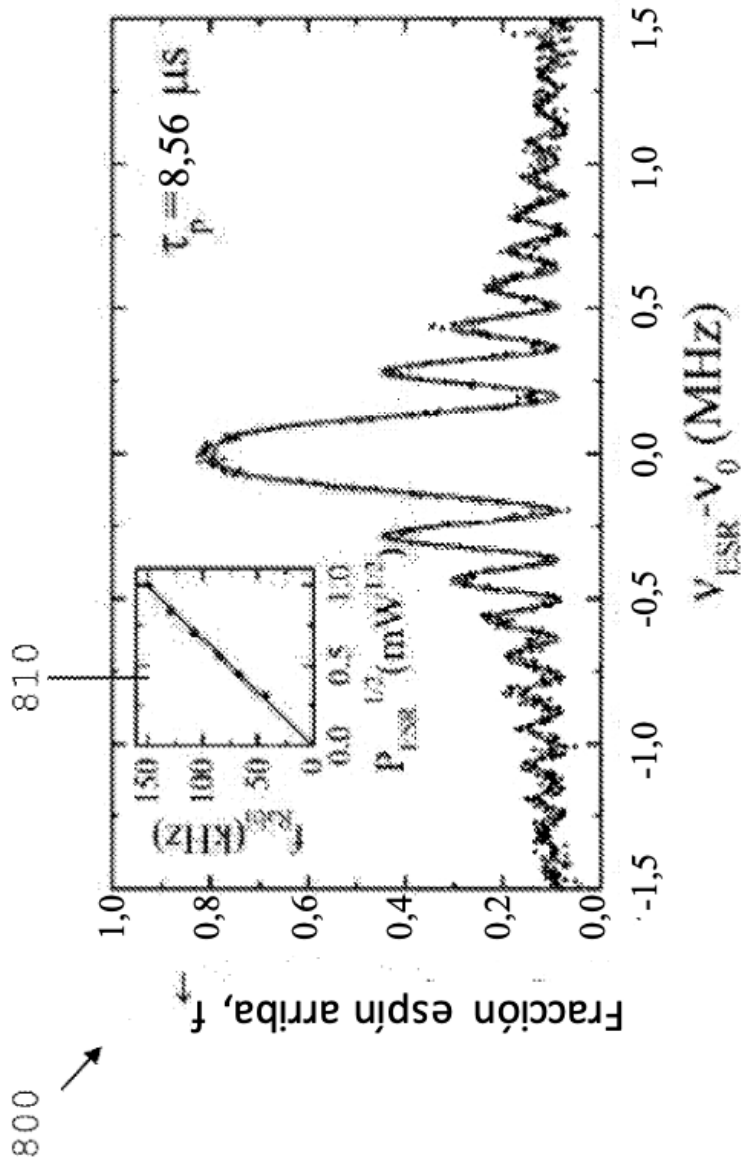


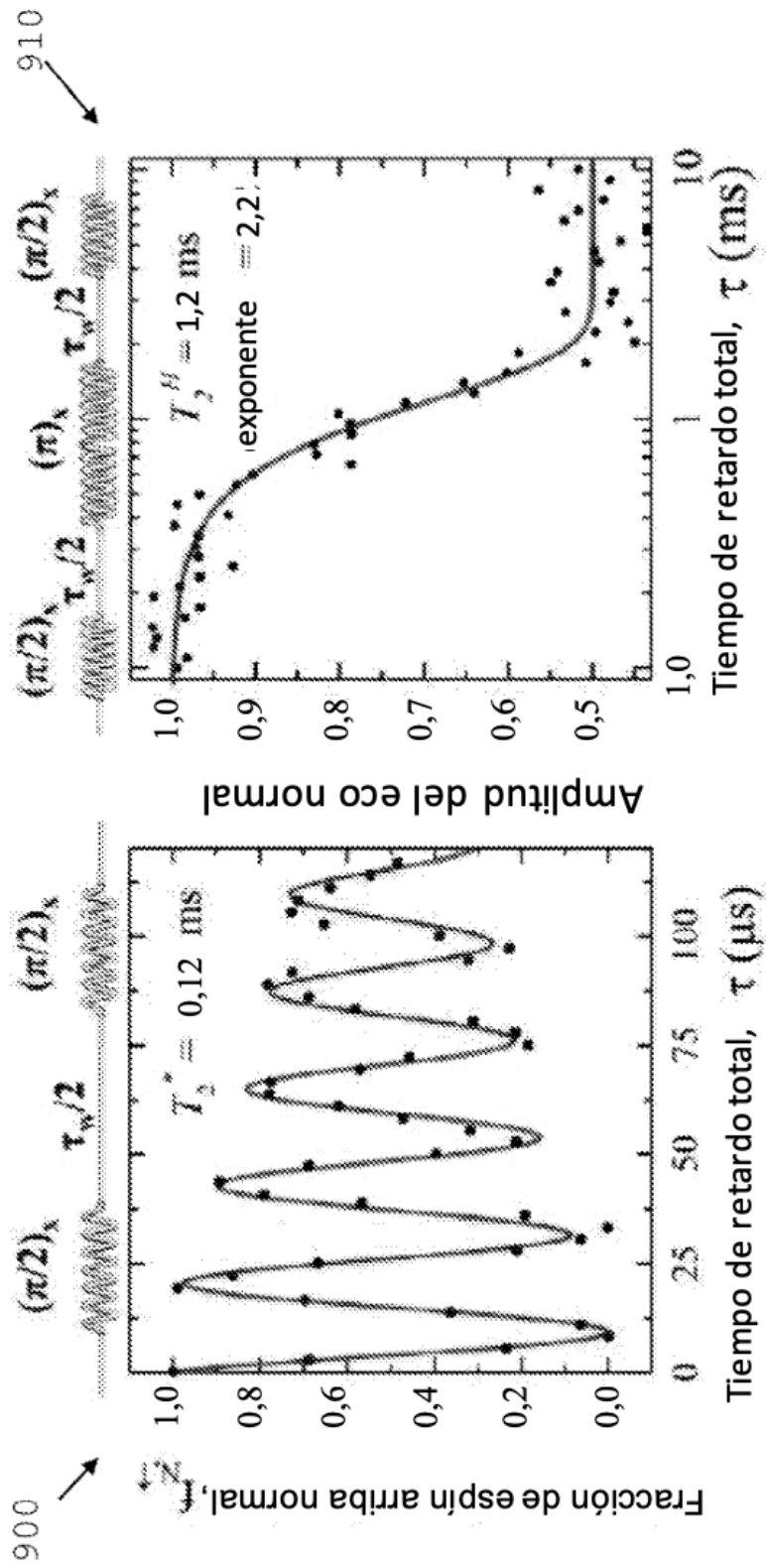
Figura 6(b)



**Figura 7**



**Figura 8**



**Figura 9(a)**

**Figura 9(b)**

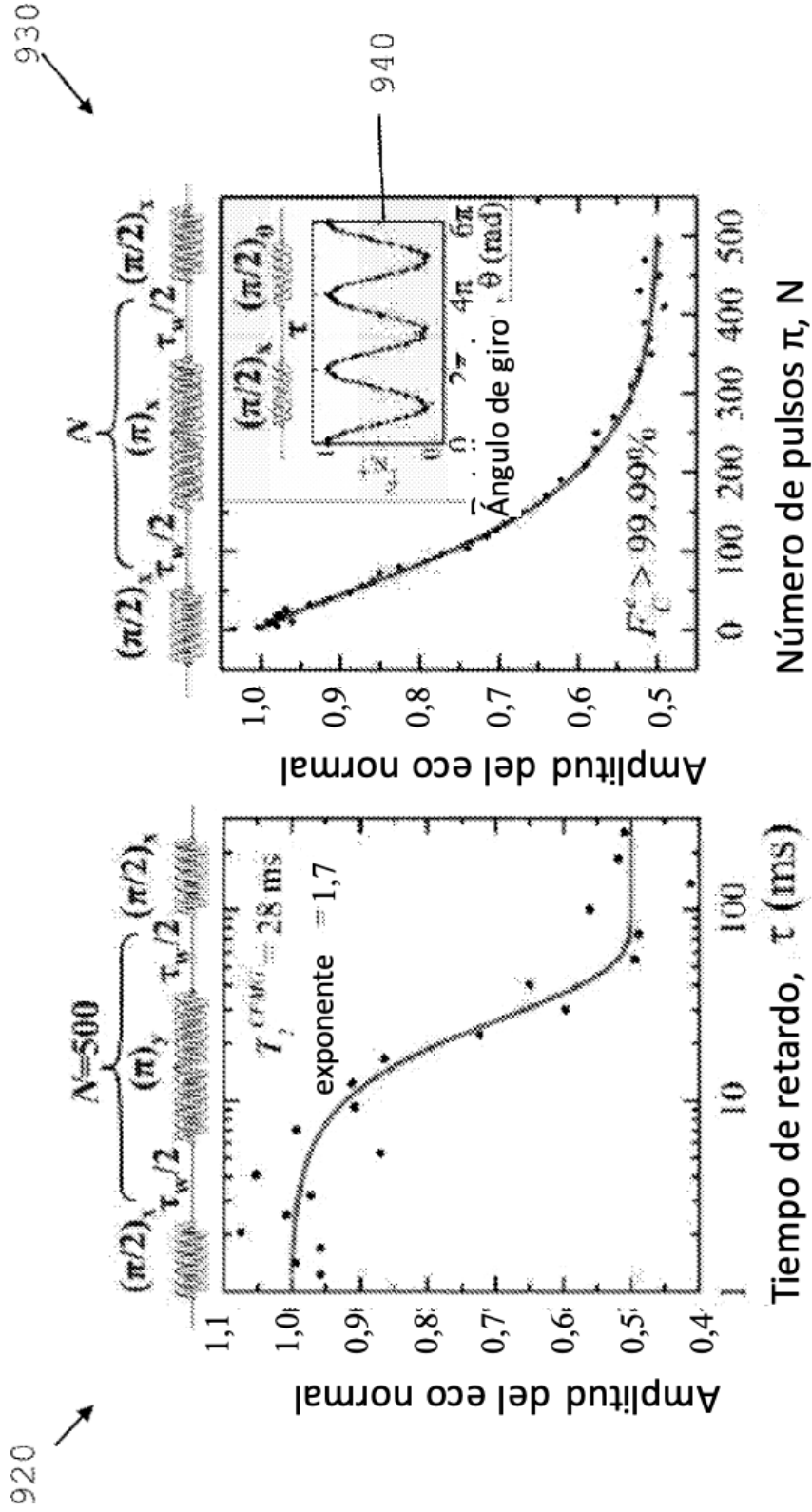


Figura 10(a)

Figura 10(b)

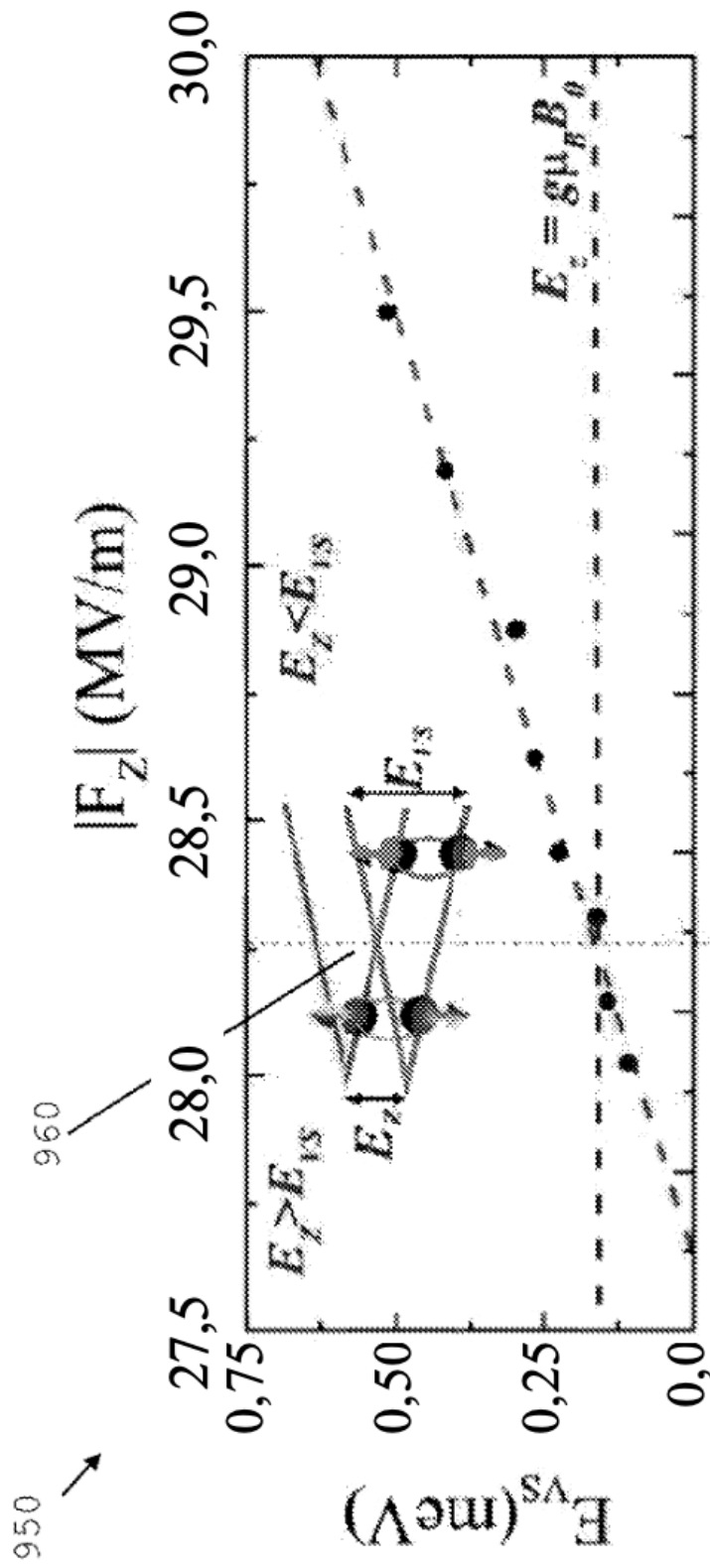


Figura 11

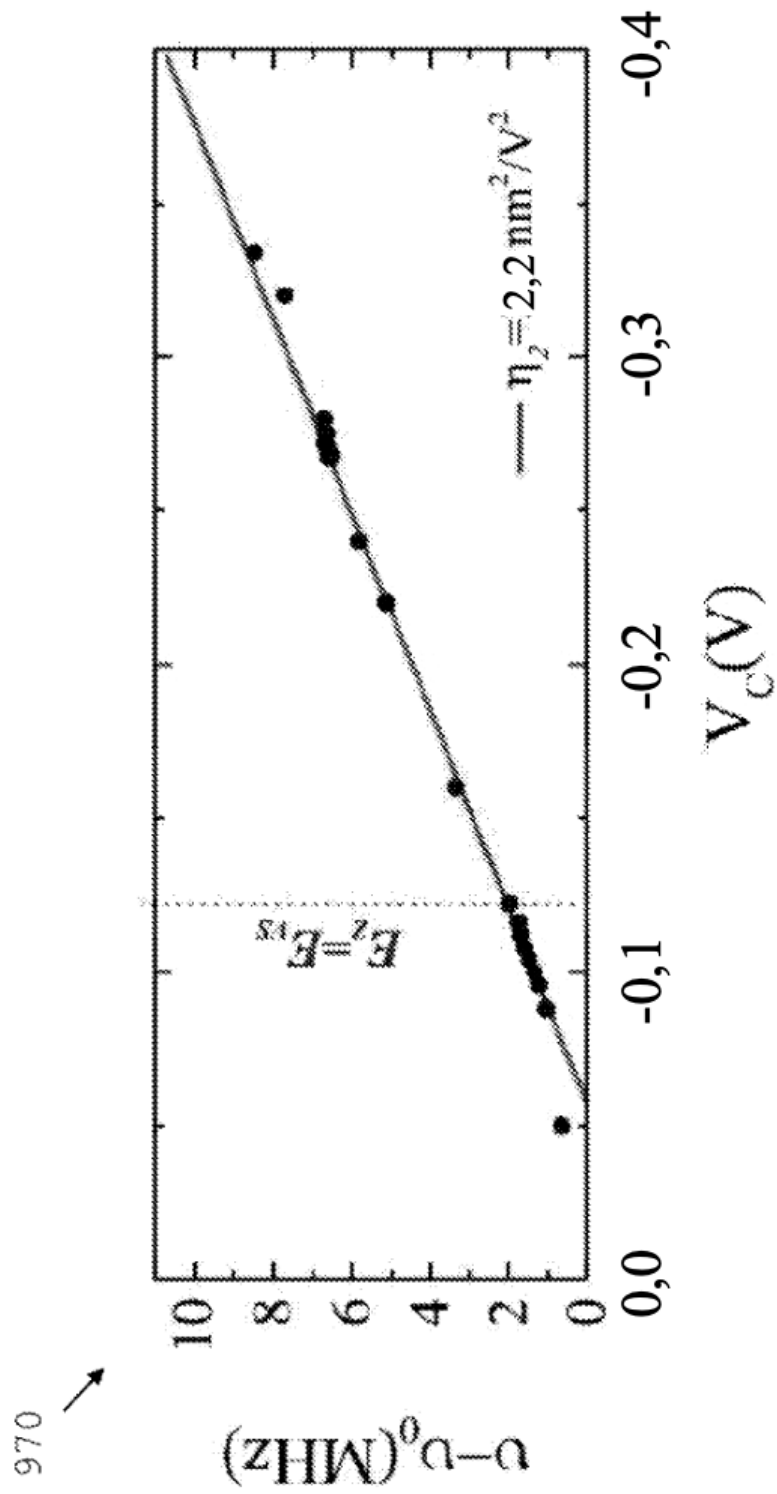


Figura 12