



Universidad Internacional de la Rioja (UNIR)

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Máster en Computación Cuántica

Implementación física de un procesador cuántico.

Qubits de puntos cuánticos

Actividad de la asignatura

presentada por: Miguel Aliende García

Profesor: David Pérez de Lara

Fecha: 11 de Junio de 2024

Índice de contenidos

1	Introducción	1
2	Desarrollo del trabajo	2
2.1	Confinamiento cuántico	2
2.2	Puntos cuánticos semiconductores	2
2.2.1	Fabricación puntos cuánticos semiconductores	3
2.2.2	Puntos cuánticos semiconductores basados en carga	3
2.2.3	Puntos cuánticos semiconductores basados en espín	4
3	Conclusiones	6

Miguel Aliende García

1. Introducción

La computación cuántica se ha convertido en uno de los campos más prometedores de la tecnología moderna, con el potencial de revolucionar áreas como la criptografía, la simulación de sistemas físicos complejos y la optimización de problemas. Una parte fundamental de esta revolución se encuentran los qubits, las unidades fundamentales de información en los computadores cuánticos. A diferencia de los bits clásicos que solo pueden existir en estados 0 o 1, los qubits pueden estar en una superposición de ambos estados, permitiendo un procesamiento de información mucho más potente.

Entre las diversas plataformas propuestas para la implementación de qubits, los puntos cuánticos destacan por su capacidad para confinar electrones en estructuras nanométricas, ofreciendo una gran controlabilidad y estabilidad. Los puntos cuánticos son una manifestación concreta del confinamiento cuántico, donde los electrones están restringidos en todas las dimensiones espaciales, resultando en una densidad de estados discretizada que emula las propiedades de los átomos. Por esta razón, los electrones confinados en puntos cuánticos son a menudo referidos como "átomos artificiales".

Este trabajo se centra en el estudio de los qubits basados en puntos cuánticos semiconductores, explorando tanto su fabricación como sus aplicaciones en la computación cuántica. Abordaremos la manera en que los puntos cuánticos semiconductores pueden ser utilizados para codificar qubits, tanto mediante el confinamiento de carga como mediante el espín de los portadores. Además, se discutirán las ventajas y desafíos asociados con cada tipo de qubit, así como las técnicas de medición y control necesarias para su implementación en sistemas de computación cuántica.

2. Desarrollo del trabajo

2.1 Confinamiento cuántico

Los puntos cuánticos son una forma concreta de confinamiento cuántico. Por lo general, los portadores de carga en un material conductor o semiconductor pueden moverse libremente y podemos aproximarlos como electrones libres. En este punto necesitamos introducir el concepto de densidad de estados, se trata de el número de estados por intervalo de energía en un sistema físico. En caso de que un electrón se pueda mover sin restricciones en el espacio, su densidad de estados será continua. Si somos capaces de restringir una de las dimensiones del espacio del material a tamaños comparables con la longitud del electrón provocamos que sus densidad de estados se discretice en la dirección en la que hemos aplicado la restricción, formando de esta manera lo que llamamos un pozo de potencial.

Si reducimos el resto de dimensiones espaciales lo que hacemos es cuantizar por completo la densidad de estados del electrón. Esto es lo que conocemos como punto cuántico, y hemos conseguido de esta manera discretizar los niveles de energía y que dependan sólo de la geometría de este punto. Si expresamos la densidad de estados en función de la banda de conducción de un semiconductor E_c , tenemos:

$$g(E_c) = 2\delta(E - E_c) \quad (2.1)$$

Siendo E la energía cinética del electrón libre. La ventaja de haber conseguido discretizar el espectro de energía de un electrón en un punto cuántico es que podemos aproximarlos a los estados de energía de un átomo, lo que proporciona una propiedades ópticas que podemos usar en la computación cuántica. Por este motivo, estos electrones confinados se conocen también como átomos artificiales.

2.2 Puntos cuánticos semiconductores

Actualmente existen muchas formas de crear puntos cuánticos, aunque sólo nos vamos a centrar en los puntos cuánticos semiconductores por su ventajas para la computación

cuántica.

2.2.1 Fabricación puntos cuánticos semiconductores

Para entender como podemos crear esta clase puntos cuánticos, partimos de un pozo potencial de un material semiconductor como puede ser el silicio, de esta manera ya hemos reducción a dos dimensiones la libertad de movimiento. Para crear el punto cuántico lo hacemos mediante electrodos en las paredes del pozo, lo que nos permite crear barreras de potencial que no solo confinan al electrón si no que además podemos controlar el lugar y la intensidad de confinamiento. Luego veremos como podemos aprovechar este control para cumplir con los requisitos de un ordenador cuántico.

Esta estructura de confinamiento nos va a permitir crear varios tipos de sistemas cuánticos a dos niveles con los que podemos codificar nuestros qubits, hablaremos entonces de los puntos cuánticos semiconductores basados en carga y en espín.

2.2.2 Puntos cuánticos semiconductores basados en carga

Este tipo de qubit se basan en la facilidad de medir si tenemos carga eléctrica o no en una región de confinamiento, es decir, si tenemos portadores confinados o no en un punto cuántico. La principal ventaja de estos sistemas es la facilidad para detectar la presencia de carga en un punto cuántico (Elzerman et al., 2003), mientras que su desventaja es que son muy sensibles a ruido eléctrico, lo que compromete mucho su tiempo de coherencia. Los primeros puntos cuánticos de este tipo se basaron en arsénico (Reed et al., 1988), aunque reciente experimentos dicen que si se fabrican con silicio se pueden alcanzar tiempos de coherencia mucho mayores (Penthorn et al., 2019).

Una posible codificación de este tipo de qubits sería el siguiente escenario: partimos de dos puntos cuánticos adyacentes, separados por un potencial regulable. Distinguiremos entre los estados $|L\rangle$, si el electrón se encuentra en el punto de la izquierda y $|R\rangle$ si se encuentra en el de la derecha. Con esta configuración, somos capaces de modular la barrera potencial que separa ambos puntos (Hayashi et al., 2003) y por efecto túnel, conseguimos un estado de superposición inicial $\alpha|L\rangle + \beta|R\rangle$.

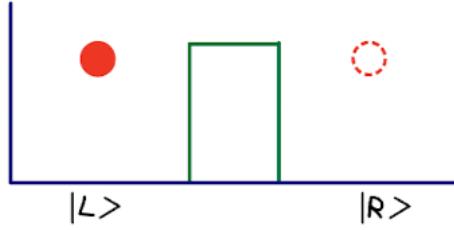


Figura 2.1: Inicialización qubits de puntos cuánticos basados en carga. Fuente: Elaboración propia

Utilizando los mismos electrodos modúlables que permiten la fabricación del punto cuántico también podemos mover el electrón de un punto a otro y como hemos visto también alcanzar un estado de superposición, implementando así todas las rotaciones en la esfera de Bloch para un sólo qubit (Cao et al., 2013).

2.2.3 Puntos cuánticos semiconductores basados en espín

Otra alternativa para codificar qubits en puntos cuánticos es utilizar el espín de los portadores (Loss y DiVincenzo, 1998). Veremos como este tipo de codificación nos permite aumentar significativamente los tiempos de coherencia. Existen muchas formas de codificar qubits utilizando el espín de un portador confinado, como:

- **Qubit de espín único:** Es el más clásico, en el que los estados de qubit corresponden con los estados del espín del electrón atrapado: $|\psi\rangle = \alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle$
- **Dos electrones en dos puntos cuánticos:** Utilizamos para codificar el singlete $|S\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ y el triplete $|T\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$.
- Modelos híbridos de espín-carga.

Para inicializar estos qubits una opción sería por termalización al estado de espín en reposo, pero no es muy viable debido a que los tiempos de relajación del espín pueden ser de hasta segundos. Por esto una de las técnicas más usadas para inicializar estos qubits es alineando un nivel concreto del sistema de dos niveles con un depósito, se conoce como tunelización selectiva de espín (Petta et al., 2005), donde la fidelidad es cercana al 99%.

Cada tipo de codificación requiere diferentes métodos para realizar rotaciones en la esfera de Bloch, así como puertas de varios qubits entrelazados. Vamos a ver dos de estos métodos:

- Campos magnéticos: Apagando y encendiendo durante breves intervalos campos magnéticos junto al qubit, permite realizar rotaciones de espín mediante la resonancia electrón-espín. Este método consiste en utilizar pulsos de microondas resonantes que coincidan con la frecuencia de Larmor del qubit y, por tanto, provoquen rotaciones entre distintos niveles de energía (Koppens et al., 2006).
- Pulsos de tensión rápida: Se pueden utilizar estos pulsos para modificar la función de onda del electrón. Los pulsos de microondas se utilizan para hacer oscilar la función de onda del electrón para obtener campo magnético que varía con el tiempo mediante un campo orbita-espín. El resultado es una forma de resonancia del espín que implica dipolo eléctrico de transición,, que se conoce como *Electric Dipole Spin Resonance (EDSR)*.(Corna et al., 2018)

La mayor dificultad que nos enfrentamos con este sistema de puntos cuánticos es a la hora de medir. Esto es principalmente debido a que el momento de un espín es muy pequeño, por lo tanto, resulta muy difícil de medir. Por otro lado como hemos comentado antes, las técnicas para detectar variaciones de carga se han perfeccionado mucho y por lo ello, lo que vamos a hacer para medir estos qubits es una conversión espín-carga. Para implementar este sistema, tenemos que conseguir que el desplazamiento de carga entre dos puntos cuántico dependa del estado del espín del qubit, con un detector de carga entonces podríamos medir el estado del qubit. Mediante esta técnica, se ha conseguido medir estados de qubits de puntos cuánticos basados en espín en microsegundos (Zheng et al., 2019)

3. Conclusiones

El estudio de los qubits basados en puntos cuánticos semiconductores proporciona una visión detallada de una de las tecnologías más prometedoras en la computación cuántica. A través del confinamiento cuántico, somos capaces de crear puntos cuánticos con propiedades únicas.

Los puntos cuánticos semiconductores ofrecen dos enfoques principales para la codificación de qubits: basados en carga y basados en espín. Los qubits basados en carga destacan por su fácil detección y manipulación, aunque son vulnerables al ruido eléctrico, lo que limita su tiempo de coherencia. Por otro lado, los qubits basados en espín, aunque más difíciles de medir, ofrecen tiempos de coherencia mucho mayores y diversas formas de codificación que mejoran su robustez y funcionalidad.

La fabricación de puntos cuánticos mediante la modulación de potenciales y el uso de electrodos ha demostrado ser una técnica efectiva para controlar y manipular qubits, permitiendo la implementación de diversas operaciones cuánticas. Sin embargo, la medición precisa de los estados cuánticos sigue siendo un desafío, a pesar de los avances en técnicas como la conversión espín-carga.

En resumen, los qubits basados en puntos cuánticos semiconductores representan una tecnología clave para el futuro de la computación cuántica. A pesar de los desafíos actuales, los avances continuos en su fabricación, control y medición prometen un progreso significativo hacia la realización de computadores cuánticos prácticos y eficientes.

Bibliography

- Benioff, P. (1980). The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *J Stat Phys* 22, 563–591.
- Feynman, R.P. (1982). Simulating physics with computers. *Int J Theor Phys* 21, 467–488.
- Reed, M. et al. (1988). Observation of discrete electronic states in a zero-dimensional semiconductor nanostructure. *Phys. Rev. Lett.* 60, 535–537.
- Hayashi, T. et al. (2003). Coherent manipulation of electronic states in a double quantum dot. *Phys. Rev. Lett.* 91, 226804.
- Cao, G. et al. (2013). Ultrafast universal quantum control of a quantum-dot charge qubit using Landau–Zener–Stückelberg interference.
- Loss, D. y DiVincenzo, D. (1998). Quantum computation with quantum dots. *Phys. Rev. A* 57, 120–126.
- Penthorn, N. E. et al. (2019). Two-axis quantum control of a fast valley qubit in silicon. *npj Quantum Inf* 5, 94.
- Elzerman, J. M. et al. (2003). Few-electron quantum dot circuit with integrated charge read out. *Phys. Rev. B* 67, 161308.
- Petta, J. et al. (2005). Coherent manipulation of coupled electron spins in semiconductor quantum dots. *Science* 309, 2180–2184.
- Koppens, F. et al. (2006). Driven coherent oscillations of a single electron spin in a quantum dot. *Nature* 442, 766–771.
- Corna, F. et al. (2018). Electrically driven electron spin resonance mediated by spin–valley–orbit coupling in a silicon quantum dot. *npj Quantum Information*.
- Zheng, G. et al. (2019). Rapid gate-based spin read-out in silicon using an on-chip resonator. *Nature Nanotechnology* 14, 742–746.